

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



ESTUDO DO RUÍDO SÍSMICO NO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE

Joana Rosa Nunes

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Geofísica Interna

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



ESTUDO DO RUÍDO SÍSMICO NO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE

Joana Rosa Nunes

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Geofísica Interna

Dissertação orientada pelas
Prof. Doutora Graça Silveira e Prof. Doutora Paula Teves Costa

2010

Agradecimentos

Gostaria de agradecer de um modo geral a todos os que tornaram possível este trabalho.

Entre eles gostaria de destacar, as minhas orientadoras Professora Doutora Paula Teves Costa e Professora Doutora Graça Silveira pela orientação e ajuda, mas principalmente pela possibilidade que me proporcionaram de dar mais um passo em frente tanto a nível profissional, académico como pessoal.

Este trabalho também não seria possível sem o apoio logístico concedido pelo Instituto Dom Luiz (IDL) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) que financiou o projecto no âmbito do qual o trabalho foi realizado, facilitando o acesso aos dados sísmicos analisados.

Gostaria também de agradecer a todos os colegas de laboratório pelos conselhos e apoio, e finalmente, mas não os menos importantes à família e amigos pela compreensão, força e ânimo nos momentos mais difíceis.

Abstract

Traditionally the study of Earth's internal structure has been based on analysis of seismic waves recorded during the occurrence of earthquakes. Recently, some researchers have shown to be possible to use ambient seismic noise (generally generated by ocean storms) to obtain dispersion curves with satisfactory results. Moreover, the use of ambient seismic noise measurement has advantages because they are independent of the earthquake-station geometry.

This study aims to determine the dispersion curves of Rayleigh waves from the analysis of ambient seismic noise records, obtained in Cape Verde archipelago, whose origin and structure has attracted interest from several researchers.

Analyzing the data collected between November 2007 and September 2008, Green's functions were determined. The analysis of these functions allowed to construct energy diagrams and to measure dispersion curves of group velocities between pairs of stations.

Key-words:

Cape Verde, ambient seismic noise, Rayleigh waves, group velocity

Resumo

Tradicionalmente o estudo da estrutura interna da Terra tem sido baseado na análise das ondas sísmicas, registadas durante a ocorrência de sismos. Recentemente, alguns investigadores têm mostrado ser possível utilizar o ruído sísmico ambiente (geralmente gerado por tempestades oceânicas) para a obtenção de curvas de dispersão, obtendo-se resultados satisfatórios. Além disso, a utilização de registos de ruído sísmico ambiente apresenta vantagens pelo facto de serem independentes da geometria sismo-estação.

Neste estudo pretende-se determinar as curvas de dispersão das ondas Rayleigh a partir da análise de registos de ruído sísmico ambiente, realizados no arquipélago de Cabo Verde, cuja origem e estrutura tem despertado interesse por parte de diversos investigadores.

Analisando os registos obtidos entre Novembro de 2007 e Setembro de 2008, determinaram-se funções de Green. A análise destas funções permitiu construir diagramas de energia e medir as curvas de dispersão das velocidades de grupo entre os diferentes pares de estações.

Palavras-chave:

Cabo Verde, ruído sísmico ambiente, ondas Rayleigh, velocidade de grupo

Índice

Agradecimentos.....	i
Abstract	ii
Resumo.....	ii
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	vii
1 Introdução.....	1
2 Cabo Verde – Enquadramento Geofísico	2
3 Metodologia	7
3.1 Determinação das funções de Green a partir de um campo de ondas aleatório	7
3.2 Análise do ruído sísmico ambiente	9
3.2.1 Normalização no domínio do tempo.....	11
3.2.2 Normalização no domínio da frequência.....	13
3.2.3 Correlação Cruzada	14
3.3 Análise Tempo/Frequência das Funções de Green	15
3.3.1 Conceitos Gerais.....	15
3.3.2 Diagramas de Energia e Velocidades de Grupo.....	17
4 Os Dados	18
5 Processamento dos Dados de Banda Larga.....	20
6 Resultados	28
6.1 Funções de Green obtidos a partir de um campo de ondas aleatório	28
6.2 Diagramas de energia	34
6.3 Curvas de dispersão.....	36
6.3.1 Curvas de dispersão de trajectos sobre ilhas.....	37
6.3.2 Curvas de dispersão de trajectos sobre o mar	40
7 Conclusões	44
Referências	45
Anexos.....	48

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE. A BATIMETRIA E A TOPOGRAFIA FORAM REPRESENTADAS USANDO O ETOPO2 (HTTP://WWW.NGDC.NOAA.GOV/MGG/GLOBAL/ETOP2.HTML).	2
FIGURA 2.2 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS DEZ ILHAS E DOS ILHÉUS DO ARQUIPÉLAGO DA REPÚBLICA DE CABO VERDE. A FIGURA FOI CONSTRUÍDA UTILIZANDO A MESMA ESCALA DE CORES DA FIGURA 2.1. AS ILHAS APRESENTADAS SÃO, A PARTIR DE NOROESTE, E SEGUINDO OS PONTEIROS DO RELÓGIO: SANTO ANTÃO, SÃO VICENTE, SANTA LUZIA, SÃO NICOLAU, SAL, BOA VISTA, MAIO, SANTIAGO, FOGO E BRAVA.	3
FIGURA 2.3 - ESTRUTURA DA CRUSTA E DO MANTO SUPERIOR SOB TODAS AS ESTAÇÕES, DE OESTE PARA ESTE. OS VALORES APRESENTADOS SÃO VELOCIDADES DAS ONDAS P, EM KM/S. RETIRADO DE LODGE & HELFFRICH (2006).	5
FIGURA 2.4 - LOCALIZAÇÃO DO PERFIL <i>WIDE-ANGLE</i> . AS LINHAS MARCADAS COM PONTOS REPRESENTAM AS ANOMALIAS MAGNÉTICAS M0 A M21. AS LINHAS A VERMELHO CORRESPONDEM AOS PERFIS SÍSMICOS DOS TRABALHOS ALI ET AL. (2003A, B). O PERFIL <i>WIDE-ANGLE</i> FOI FEITO ENTRE AS DUAS CRUZES A PRETO. OS CÍRCULOS NÃO PREENCHIDOS E O CÍRCULO VERMELHO SÃO OBS, ENQUANTO QUE OS CÍRCULOS A PRETO MOSTRAM A LOCALIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO. A BATIMETRIA APRESENTADA É A GEBCO 1 (HTTP://WWW.GEBCO.NET/). RETIRADO DE PIM ET AL. (2008).	6
FIGURA 3.1 - ESQUEMA EXPLICATIVO DA EMISSÃO DE UM SINAL IMPULSIVO DA FONTE S E RECEPÇÃO DESTE NOS RECEPTORES A E B. $G_{AS}(T)$ E $G_{BS}(T)$ REPRESENTAM A FUNÇÃO DE GREEN ENTRE A E S E ENTRE B E S, RESPECTIVAMENTE. ADAPTADO DE LANDÈS (2006).	8
FIGURA 3.2 - ESQUEMA EXPLICATIVO DA EXPERIÊNCIA FICTÍCIA DESCRITA EM CIMA. O LADO ESQUERDO DA FIGURA É RELATIVO À PROPAGAÇÃO DO SINAL DE A PARA S. O LADO DIREITO É RELATIVO AO REENVIO DO SINAL DE A E À RECEPÇÃO DOS SINAIS EM B. ADAPTADO DE LANDÈS (2006).	9
FIGURA 3.3 – REGISTO INSTRUMENTAL OBTIDO DURANTE UM DIA: É POSSÍVEL COMPARAR A QUANTIDADE DE REGISTOS DE RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE POSSÍVEIS, FACE A UM ÚNICO EVENTO SÍSMICO. ADAPTADO DE GOUÉDARD (2008).	10
FIGURA 3.4 - (A) LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES ANMO E CCM. (B) CORRELAÇÃO CRUZADA PARA DIFERENTES BANDAS DE FREQUÊNCIA, ASSINALADAS NOS RESPECTIVOS GRÁFICOS. A LINHA A PONTEADO SALIENTA A DISPERSÃO DO SINAL, VERIFICANDO-SE QUE A CHEGADA DAS PEQUENAS FREQUÊNCIAS (LONGOS PERÍODOS) É ANTERIOR À DAS GRANDES FREQUÊNCIAS (CURTOS PERÍODOS). RETIRADO DE SHAPIRO & CAMPILLO (2004).	11
FIGURA 3.5 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO A 1-BIT PARA A ESTAÇÃO CVSV4 NO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2007. EM CIMA OBSERVA-SE O RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE ANTES DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO A 1-BIT, ONDE SE PODE VERIFICAR A OCORRÊNCIA DE UM EVENTO SÍSMICO. EM BAIXO MOSTRA-SE O RESULTADO APÓS A NORMALIZAÇÃO, VERIFICANDO-SE A EFICAZ ELIMINAÇÃO DO EFEITO DO SISMO.	12
FIGURA 3.6 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO PARA A ESTAÇÃO CVSV4 NO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2007. EM CIMA OBSERVA-SE O RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE ANTES DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO DA MÉDIA DESLIZANTE, ONDE SE PODE VERIFICAR A OCORRÊNCIA DE UM EVENTO SÍSMICO. EM BAIXO MOSTRA-SE O RESULTADO APÓS A NORMALIZAÇÃO, VERIFICANDO-SE A EFICAZ ELIMINAÇÃO DO EFEITO DO SISMO.	13
FIGURA 3.7 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DO BRANQUEAMENTO ESPECTRAL PARA A ESTAÇÃO CVSV4 NO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2007. NESTA FIGURA SÃO REPRESENTADOS OS ESPECTROS DO RUÍDO, OU SEJA, AMPLITUDE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA OU DO PERÍODO. EM CIMA OBSERVA-SE O RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE (TEMPORALMENTE NORMALIZADO) ANTES DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO ESPECTRAL. EM BAIXO ENCONTRA-SE O RESULTADO APÓS A APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO, VERIFICANDO-SE ASSIM A EFICÁCIA DA NORMALIZAÇÃO. NESTE ÚLTIMO GRÁFICO (RUÍDO ESPECTRALMENTE NORMALIZADO), SÓ É REPRESENTADO OS RESULTADOS DA BANDA DE PERÍODOS ENTRE 5 E 150 SEGUNDOS (APROXIMADAMENTE ENTRE 0.007 E 0.2 Hz), DECAINDO EXPONENCIALMENTE ATÉ AO VALOR ZERO, A PARTIR DESSES VALORES LIMITE DA BANDA. ...	14
FIGURA 3.8 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DO BRANQUEAMENTO ESPECTRAL PARA A ESTAÇÃO CVSV4 NO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2007. NESTA FIGURA SÃO REPRESENTADOS OS MESMOS RESULTADOS QUE A FIGURA ANTERIOR MAS NESTE CASO EM FUNÇÃO DO TEMPO. EM CIMA OBSERVA-SE O RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE (TEMPORALMENTE NORMALIZADO) ANTES DA APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO ESPECTRAL. EM BAIXO ENCONTRA-SE O RESULTADO APÓS A APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO.	14
FIGURA 3.9 - CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS ESTAÇÕES CVSL2 E CVST1 (CORRESPONDENTES ÀS ILHAS SAL E SANTIAGO) PARA O MÊS DE DEZEMBRO.	15
FIGURA 3.10 - CURVAS DE DISPERSÃO DAS VELOCIDADES DE GRUPO. AS LINHAS SÓLIDAS REPRESENTAM A VELOCIDADE DE GRUPO PARA AS ONDAS RAYLEIGH, ENQUANTO QUE AS LINHAS A PONTEADO REPRESENTAM A VELOCIDADE DE GRUPO PARA AS ONDAS LOVE. NESTA FIGURA É POSSÍVEL OBSERVAR, NÃO SÓ A DEPENDÊNCIA DAS VELOCIDADES DE GRUPO NOS PERÍODOS, COMO TAMBÉM A FORMA QUE NORMALMENTE AS CURVAS DE DISPERSÃO ADQUIREM. NESTA FIGURA OBSERVA-SE GRANDES DIFERENÇAS ENTRE ONDAS QUE	

VIAJAM AO LONGO DE TRAJECTOS SOBRE OS OCEANOS E ONDAS QUE VIAJAM SOBRE CONTINENTES. RETIRADO DE UDÍAS (1999).	17
FIGURA 4.1 - LOCALIZAÇÃO DAS 39 ESTAÇÕES QUE ESTIVERAM A OPERAR EM CABO VERDE ENTRE NOVEMBRO DE 2007 E SETEMBRO DE 2008.	18
FIGURA 4.2 - COBERTURA AZIMUTAL DOS TRAJECTOS ENTRE PARES DE ESTAÇÕES.	19
FIGURA 5.1 - ESQUEMA DAS TRÊS PRIMEIRAS FASES DO PROCESSAMENTO DE DADOS: A PRIMEIRA FASE CONSISTE NA PREPARAÇÃO DOS DADOS A ANALISAR, DE CADA UMA DAS ESTAÇÕES; A SEGUNDA CONSISTE NO CÁLCULO DA CORRELAÇÃO CRUZADA E NO <i>STACK</i> (EMPILHAMENTO TEMPORAL) DOS DADOS E A TERCEIRA CONSISTE NA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE DISPERSÃO A PARTIR DA ANÁLISE TEMPO/FREQUÊNCIA. ADAPTADO DE BENSEN ET AL. (2007).	20
FIGURA 5.2 - REGISTOS DOS DADOS DO DIA 16 DE DEZEMBRO DE 2007 DA ESTAÇÃO CVST3 (ILHA DE SANTIAGO). O PRIMEIRO GRÁFICO É O REGISTO ANTES DE SE APLICAR AS NORMALIZAÇÕES, O SEGUNDO E TERCEIRO SÃO OS REGISTOS APÓS APLICAÇÃO DAS NORMALIZAÇÕES. NO PRIMEIRO CASO SEGUIU-SE O MÉTODO MÉDIA DESLIZANTE E O SEGUNDO NO MÉTODO 1-BIT. TENDO EM CONTA A DIFERENÇA DE ESCALAS DO EIXO VERTICAL DOS GRÁFICOS, VERIFICA-SE QUE AMBOS OS MÉTODOS SÃO EFICAZES ATENUANDO AS AMPLITUDES, SENDO O SEGUNDO MÉTODO MAIS AGRESSIVO.	21
FIGURA 5.3 - NESTA FIGURA ESTÁ REPRESENTADO O RESULTADO DA CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS ESTAÇÕES CVMA1 E CVSA1. EM CIMA É O RESULTADO PARA O CASO DE SE REALIZAR O <i>STACK</i> PARA UM MÊS (DEZEMBRO), EM BAIXO É O RESULTADO DA MESMA CORRELAÇÃO MAS PARA O CASO DE SE REALIZAR O <i>STACK</i> PARA A TOTALIDADE DA DURAÇÃO DOS DADOS (PRATICAMENTE UM ANO). COMPARANDO OS DOIS GRÁFICOS DESTA FIGURA, VERIFICA-SE O MELHORAMENTO DA RAZÃO SINAL/RUÍDO COM O <i>STACK</i> .	22
FIGURA 5.4 - COMPORTAMENTO DA RAZÃO SINAL/RUÍDO EM FUNÇÃO DO PERÍODO.	22
FIGURA 5.5 - GRÁFICO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DAS ONDAS EM FUNÇÃO DOS MESES DO ANO, PARA A REGIÃO DE CABO VERDE DURANTE O TEMPO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	24
FIGURA 5.6 - GRÁFICO DO PERÍODO MÉDIO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DOS MESES DO ANO, PARA A REGIÃO DE CABO VERDE DURANTE O TEMPO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	25
FIGURA 5.7 - GRÁFICO DA PRESSÃO MÉDIA AO NÍVEL DO MAR EM FUNÇÃO DOS MESES DO ANO, PARA A REGIÃO DE CABO VERDE DURANTE O TEMPO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	25
FIGURA 5.8 - MAPA DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE INDICANDO OS DOIS TRAJECTOS ESTUDADOS NAS FIGURAS 5.9 E 5.10. O TRAJECTO DE CIMA CORRESPONDE AO DAS ILHAS SANTO ANTÃO E SAL E O TRAJECTO DE BAIXO CORRESPONDE AO DAS ILHAS MAIO E SAL.	26
FIGURA 5.9 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA DO TRAJECTO ENTRE AS ILHAS MAIO E SAL PARA AS ÉPOCAS DEFINIDAS ANTERIORMENTE. NESTA FIGURA OBSERVA-SE QUE A PARTE CAUSAL TEM MENOR AMPLITUDE QUE A PARTE ANTI-CAUSAL.	27
FIGURA 5.10 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA DO TRAJECTO ENTRE AS ILHAS SANTO ANTÃO E SAL PARA AS ÉPOCAS DEFINIDAS ANTERIORMENTE. NESTA FIGURA OBSERVA-SE QUE A PARTE CAUSAL TEM MENOR AMPLITUDE QUE A PARTE ANTI-CAUSAL.	27
FIGURA 6.1 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA DOS 36 TRAJECTOS ENTRE PARES DE ILHAS, ORDENADOS POR DISTÂNCIAS. O TRAJECTO DE MENOR DISTÂNCIA É BRAVA-FOGO E O TRAJECTO DE MAIOR DISTÂNCIA É MAIO-SANTO ANTÃO. AS DISTÂNCIAS ENTRE CADA PAR DE ILHAS ESTÃO INDICADAS E ORDENADAS NA TABELA B.1 (EM ANEXO). NESTA FIGURA É POSSÍVEL IDENTIFICAR UM SEGUNDO SINAL QUE SERÁ REFERIDO MAIS ADIANTE.	28
FIGURA 6.2 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA ALGUNS TRAJECTOS ENTRE ILHAS EM QUE OS COMPRIMENTOS DOS TRAJECTOS SÃO RELATIVAMENTE SEMELHANTE. NESTA IMAGEM É POSSÍVEL VER A PARTE CAUSAL (PARTE POSITIVA DO GRÁFICO) E A PARTE ANTI-CAUSAL (PARTE NEGATIVA DO GRÁFICO). TAMBÉM SE PODE VERIFICAR A SEMELHANÇA DE AMPLITUDE ENTRE AS DUAS PARTES.	29
FIGURA 6.3 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA DA ILHA SAL COM CADA UMA DAS OUTRAS ILHAS DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE. OS RESULTADOS ESTÃO APRESENTADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS CORRELACIONADAS.	29
FIGURA 6.4 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA DAS ESTAÇÕES DA ILHA SAL COM TODAS AS OUTRAS ESTAÇÕES DAS RESTANTES ILHAS DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE. OS RESULTADOS ESTÃO APRESENTADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ESTAÇÕES CORRELACIONADAS.	30
FIGURA 6.5 - TRAJECTOS DOS RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA APRESENTADOS NAS FIGURAS 6.6 E 6.7, ONDE É POSSÍVEL ENCONTRAR UM SEGUNDO SINAL CUJA CHEGADA DEPENDE DA DISTÂNCIA E QUE NÃO SE IDENTIFICOU AINDA A CAUSA DESTA, PODENDO APENAS SUGERIR ALGUMAS POSSIBILIDADES, COMO A PROFUNDIDADE E FORMA DO ARQUIPÉLAGO.	31
FIGURA 6.6 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA OS TRAJECTOS ENTRE ILHAS QUE TÊM UM SEGUNDO SINAL. ESTE SINAL É MAIS FORTE NA PARTE CAUSAL (PARTE POSITIVA DO GRÁFICO).	31
FIGURA 6.7 - RESULTADOS DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA OS TRAJECTOS ENTRE ESTAÇÕES PARA OS MESMOS PARES DE ILHAS QUE A FIGURA 6.6. NESTA FIGURA VERIFICA-SE A EXISTÊNCIA DE UM SEGUNDO SINAL CUJAS RECTAS QUE UNE OS PONTOS DE CHEGADA DESTA SÃO SIMÉTRICAS NOS ZERO SEGUNDOS, TAL COMO	

ACONTECE COM AS RECTAS DE CHEGADA DO PRIMEIRO SINAL. TANTO NA PARTE CAUSAL COMO NA ANTI-CAUSAL, AS RECTAS DO SEGUNDO SINAL PARECEM SER PARALELAS AO DO PRIMEIRO SINAL.	32
FIGURA 6.8 - FUNÇÃO DE GREEN RESULTANTE DA CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS ESTAÇÕES CVSL2 E CVSV2. O SINAL PARA TODA A BANDA DE PERÍODOS (5-150s) ESTÁ REPRESENTADO EM CIMA, EM BAIXO DESTA ESTÁ REPRESENTADO O MESMO SINAL FILTRADO PARA VÁRIAS BANDAS DE PERÍODO DIFERENTES (INDICADA AO LADO DE CADA CASO). A FUNÇÃO DE GREEN APRESENTADA CORRESPONDE A UM CASO EM QUE É APENAS REGISTADO UM SINAL.	33
FIGURA 6.9 - FUNÇÃO DE GREEN RESULTANTE DA CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS ESTAÇÕES CVBR1 E CVSA1. O SINAL PARA TODA A BANDA DE PERÍODOS (5-150s) ESTÁ REPRESENTADO EM CIMA, EM BAIXO DESTA ESTÁ REPRESENTADO O MESMO SINAL FILTRADO PARA VÁRIAS BANDAS DE PERÍODO DIFERENTES (INDICADA AO LADO DE CADA CASO). A FUNÇÃO DE GREEN APRESENTADA CORRESPONDE A UM CASO EM QUE É REGISTADO UM SEGUNDO SINAL PROVAVELMENTE POR CAUSA DA BATIMETRIA.	33
FIGURA 6.10 - TRAJECTOS DOS RESULTADOS DOS DIAGRAMAS DE ENERGIA ANALISADOS EM BAIXO. OBSERVANDO A FIGURA VERIFICAMOS QUE OS TRAJECTOS ESCOLHIDOS ATRAVESSAM DIFERENTES ZONAS DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE. UM TRAJECTO QUE ATRAVESSA UMA ZONA MAIORITARIAMENTE SOBRE O MAR MAIS PROFUNDO (FOGO-SANTO ANTÃO), OUTRO QUE ATRAVESSA UMA ZONA MAIORITARIAMENTE SOBRE MAR POUCO PROFUNDO (BRAVA-BOA VISTA) E OUTRO QUE ATRAVESSA UMA ZONA MAIORITARIAMENTE SOBRE TERRA (BRAVA-SANTIAGO).	34
FIGURA 6.11 - DIAGRAMA DE ENERGIA PARA O TRAJECTO BRAVA-SANTIAGO. PARA ALÉM DO DIAGRAMA DE ENERGIA VEMOS A MEIO A FORMA DA FUNÇÃO DE GREEN E À DIREITA O ESPECTRO DE AMPLITUDES. OS PONTOS MARCADOS A VERMELHO NO DIAGRAMA DE ENERGIA, SÃO OS PONTOS DE MAIOR AMPLITUDE PARA CADA PERÍODO, PONTOS ESTES QUE ESTÃO ASSINALADOS (PONTOS A VERMELHO) NO GRÁFICO DO ESPECTRO DE AMPLITUDES. ESTE TRAJECTO É MAIORITARIAMENTE SOBRE ILHAS, COMO MOSTRA A FIGURA 6.10.	35
FIGURA 6.12 - DIAGRAMA DE ENERGIA PARA O TRAJECTO BRAVA-BOA VISTA. ESTE TRAJECTO É MAIORITARIAMENTE SOBRE UMA ZONA DE MAR POUCO PROFUNDO, COMO MOSTRA A FIGURA 6.10. PARA MAIS DETALHES, VER LEGENDA DA FIGURA 6.11.	35
FIGURA 6.13 - DIAGRAMA DE ENERGIA PARA O TRAJECTO FOGO-SANTO ANTÃO. ESTE TRAJECTO É MAIORITARIAMENTE SOBRE UMA ZONA DE MAR ENTRE ILHAS MAIS PROFUNDO, COMO MOSTRA A FIGURA 6.10. PARA MAIS DETALHES, VER LEGENDA DA FIGURA 6.11.	36
FIGURA 6.14 - GRÁFICO DAS CURVAS DE DISPERSÃO DAS VELOCIDADES DE GRUPO DAS ONDAS RAYLEIGH OBTIDAS NESTE TRABALHO. NESTE GRÁFICO É POSSÍVEL VERIFICAR A COERÊNCIA DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA SOBREPOSIÇÃO DA MAIORIA DAS CURVAS DE DISPERSÃO. É DE RELEMBRAR QUE ALGUMAS CURVAS SÓ TÊM SIGNIFICADO PARA OS PERÍODOS MAIS PEQUENOS DEVIDO À PROXIMIDADE DAS ESTAÇÕES.	37
FIGURA 6.15 - MAPA COM OS TRAJECTOS ENTRE ILHAS E MAIORITARIAMENTE SOBRE AS ILHAS. OS TRAJECTOS ASSINALADOS SÃO OS ESTUDADOS NAS FIGURAS 6.16, 6.17 E 6.18. NESTE MAPA A ZONA MAIS À ESQUERDA (A OESTE) REPRESENTA A ZONA DE IDADE MAIS RECENTE E A ZONA MAIS À DIREITA (A ESTE) REPRESENTA A ZONA DE IDADE MAIS ANTIGA.	38
FIGURA 6.16 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE BRAVA E FOGO. APROXIMADAMENTE A PARTIR DOS 7.5s PARA MAIORES PERÍODOS, AS CURVAS DE DISPERSÃO NÃO TÊM SIGNIFICADO DEVIDO À PEQUENA DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS.	38
FIGURA 6.17 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE SANTO ANTÃO E SÃO NICOLAU. APROXIMADAMENTE A PARTIR DOS 18s PARA MAIORES PERÍODOS AS CURVAS DE DISPERSÃO NÃO TÊM SIGNIFICADO DEVIDO À DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS.	39
FIGURA 6.18 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE MAIO E SAL. APROXIMADAMENTE A PARTIR DOS 24s PARA MAIORES PERÍODOS AS CURVAS DE DISPERSÃO NÃO TÊM SIGNIFICADO DEVIDO À DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS.	39
FIGURA 6.19 - MAPA COM OS TRAJECTOS ENTRE ILHAS E MAIORITARIAMENTE SOBRE MAR. OS TRAJECTOS ASSINALADOS SÃO OS ESTUDADOS NAS FIGURAS 6.20, 6.21, 6.22 E 6.23. NESTE MAPA A ZONA MAIS À ESQUERDA (A OESTE) REPRESENTA A ZONA DE IDADE MAIS RECENTE E A ZONA MAIS À DIREITA (A ESTE) REPRESENTA A ZONA DE IDADE MAIS ANTIGA.	40
FIGURA 6.20 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE BRAVA E SANTO ANTÃO.	41
FIGURA 6.21 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE MAIO E SÃO NICOLAU.	41
FIGURA 6.22 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE SAL E SÃO NICOLAU. APROXIMADAMENTE A PARTIR DOS 21s PARA MAIORES PERÍODOS AS CURVAS DE DISPERSÃO NÃO TÊM SIGNIFICADO DEVIDO À PEQUENA DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS.	42
FIGURA 6.23 - CURVAS DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO DO TRAJECTO ENTRE BRAVA E SÃO NICOLAU. APROXIMADAMENTE A PARTIR DOS 26s PARA MAIORES PERÍODOS AS CURVAS DE DISPERSÃO NÃO TÊM SIGNIFICADO DEVIDO À PEQUENA DISTÂNCIA ENTRE AS ILHAS.	42

Índice de Tabelas

TABELA 5.1 - CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE CABO VERDE (MÉDIAS DE 1961 A 1990). ADAPTADA DO SITE FREEMETEO (HTTP://FREEMETEO.COM/)	23
TABELA 5.2 - VELOCIDADES MÁXIMAS DE VENTO PROLONGADO ENTRE NOVEMBRO DE 2007 E SETEMBRO DE 2008. CRIADA A PARTIR DE VALORES DIÁRIOS ENCONTRADOS NO SITE FREEMETEO (HTTP://FREEMETEO.COM/).....	24

1 Introdução

Tradicionalmente, o estudo da estrutura interna da Terra tem sido baseado na análise de ondas sísmicas, registadas durante a ocorrência de eventos sísmicos. Analisando as ondas superficiais, os investigadores conseguem obter as curvas de dispersão das ondas superficiais e a frequência dos modos normais da Terra. A partir destes resultados pode-se compreender melhor o interior da Terra.

No entanto, a utilização das ondas directas tem algumas limitações (como é referido em Shapiro & Campillo, 2004), pois:

1. Estas ondas têm direcções de propagação preferenciais;
2. Requerem informações sobre a fonte, que nem sempre se conseguem estimar adequadamente;
3. Obtêm-se medidas de valores médios referentes a extensas áreas, que limitam a resolução das imagens sísmicas resultantes;
4. As medições para períodos curtos são difíceis de realizar, devido à chegada simultânea de ondas provenientes de diferentes percursos.

Recentemente, estudos como o de Shapiro & Campillo (2004), têm mostrado ser possível utilizar o ruído sísmico ambiente (gerado, por exemplo, por tempestades oceânicas) para a obtenção de curvas de dispersão.

Neste trabalho pretende-se determinar as curvas de dispersão das ondas superficiais (especificamente as ondas Rayleigh), utilizando os registos de ruído sísmico ambiente do arquipélago de Cabo Verde, cuja origem e estrutura tem despertado interesse por parte dos investigadores.

Este estudo encontra-se dividido em seis capítulos, após este primeiro de introdução. No segundo capítulo, é apresentada uma descrição da região em estudo, o arquipélago de Cabo Verde. Nesta descrição são expostas informações geofísicas e geodinâmicas da região de forma a se ter conhecimento da estrutura da litosfera e astenosfera da região. No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada neste trabalho, expondo as bases teóricas para a obtenção das funções de Green e das curvas de dispersão da velocidade de grupo. No quarto capítulo apresenta-se uma breve descrição da rede sísmica temporária de Cabo Verde, instalada no âmbito do projecto CV-PLUME (referência PTDC/CTE-GIN/64330/2006); também se apresentam os critérios de selecção dos dados utilizados neste estudo. No quinto capítulo descreve-se o processamento dos dados. Segue-se, no capítulo seis, a apresentação e descrição dos diferentes resultados obtidos, nomeadamente as funções de Green, os diagramas de energia e as curvas de dispersão. Por último, apresentam-se as conclusões do trabalho e perspectivas de desenvolvimento futuro.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto “CV-PLUME: An investigation on the geometry and deep signature of the Cape Verde mantle plume”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

2 Cabo Verde – Enquadramento Geofísico

O arquipélago de Cabo Verde situa-se no Atlântico Central, a cerca de 500 km a Oeste da costa do Senegal. É constituído por 10 ilhas vulcânicas e alguns ilhéus que se encontram dispostos em forma de ferradura, com abertura para Oeste (figura 2.1).

Cabo Verde é a expressão à superfície de um enorme planalto, de quase 1200 km de largura, que se eleva a cerca de 5 km da planície abissal entre a plataforma continental do Senegal e a Crista Média Atlântica (figura 2.1). A análise das anomalias magnéticas sugere que este planalto se encontra implantado numa crosta oceânica do Cretácico Inferior que se apresenta anormalmente superficial para a sua idade (Williams et al., 1990).

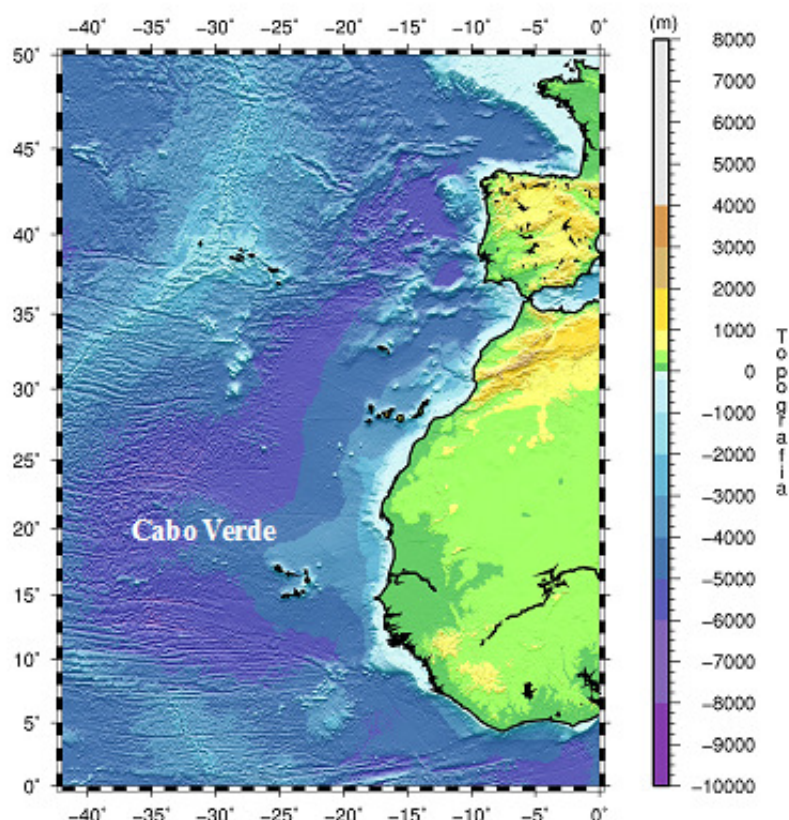


Figura 2.1 - Situação geográfica do arquipélago de Cabo Verde. A batimetria e a topografia foram representadas usando o ETOPO2 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>).

As dez ilhas distribuem-se por dois grupos: o grupo de Barlavento, que inclui as ilhas Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista, e o grupo de Sotavento, que inclui as ilhas Maio, Santiago, Fogo e Brava (figura 2.2). Santa Luzia é, actualmente, uma reserva natural e encontra-se desabitada.

As ilhas apresentam-se alinhadas ao longo de 3 segmentos de crosta sobre elevada:

- (1) um segmento orientado WNW-ESE (Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia e São Nicolau);
- (2) um segmento com uma orientação praticamente N-S (Sal e Boa Vista);
- (3) um segmento com orientação WSW-ENE (Brava, Fogo, Santiago e Maio). Uma descrição mais detalhada das diferentes ilhas pode ser encontrada em Serralheiro (1976), Matos Alves et al. (1979) ou Gerlach et al. (1988), entre outros.

A idade da crosta oceânica na região de Cabo Verde, baseada na distribuição de alinhamentos magnéticos, situa-se entre 105 Ma e os 155 Ma (Williams et al., 1990). Contudo, a

idade das ilhas é mais difícil de determinar. Determinações feitas em rochas que afloraram à superfície sugerem que as ilhas a Oeste (Santo Antão, Brava, Fogo) são as mais jovens com idades inferiores a 8 Ma, sendo as ilhas a Este (Sal, Boa Vista, Maio) as mais antigas (Stillman et al., 1982, *in* Ali et al., 2003a). A salientar que os afloramentos mais antigos foram encontrados no centro da ilha de Maio e na península a Norte de Santiago. Estes afloramentos são lavas basálticas com 128 -131 Ma, que se formaram na Crista Média Atlântica (Mitchell et al., 1983, *in* Pim et al., 2008). Parece haver um padrão de envelhecimento nas ilhas do segmento WSW-ENE, desde a Brava (a Oeste) até Maio (a Este) coerente com o movimento da placa oceânica para Nordeste. No entanto, devido à sua proximidade ao pólo de rotação da placa africana, o arquipélago de Cabo Verde parece ter permanecido quase estacionário relativamente ao referencial dos *hotspots* nos últimos 20 Ma (Duncan, 1984), com uma velocidade relativa de ~12 mm/ano (Courtney & White, 1986).

Apesar de serem ilhas de origem vulcânica, apenas algumas têm registos significativos de actividade vulcânica, nomeadamente no Fogo, Brava e Santo Antão. É também nestas últimas que têm sido assinaladas actividade sísmica sentida. A erupção vulcânica mais recente teve lugar na ilha do Fogo em 1995 (por exemplo Heleno et al., 1999).

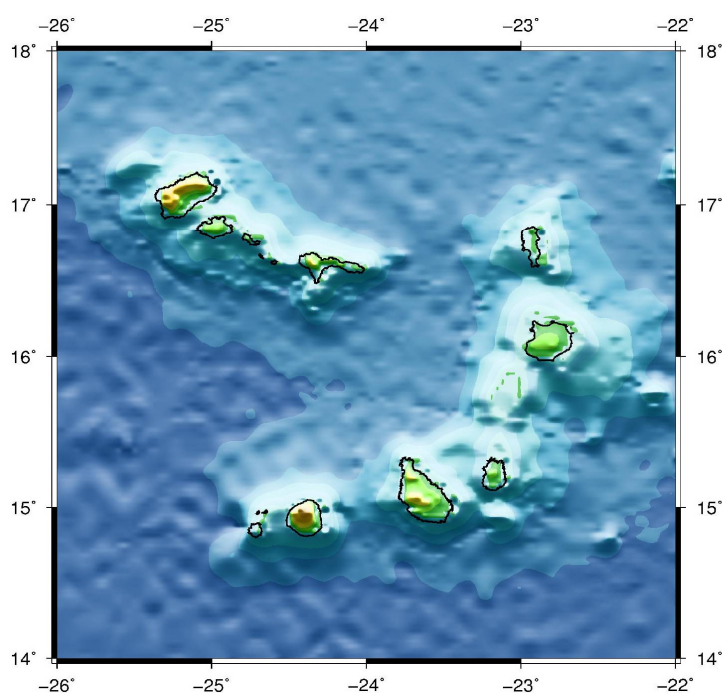


Figura 2.2 - Distribuição geográfica das dez ilhas e dos ilhéus do arquipélago da República de Cabo Verde. A figura foi construída utilizando a mesma escala de cores da Figura 2.1. As ilhas apresentadas são, a partir de Noroeste, e seguindo os ponteiros do relógio: Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal, Boa Vista, Maio, Santiago, Fogo e Brava.

Dada a sua localização na placa africana, Cabo Verde é um caso típico de vulcanismo intraplaca. Este tipo de vulcanismo está geralmente associado a cadeias de vulcões, cuja geometria linear e progressão de idades são consistentes com a cinemática da placa em que se situam. A primeira fase de vulcanismo começou no Miocénico Inferior (~20 Ma), e alcançou um pico de actividade entre 7-15 Ma, quando as ilhas atingiram a sua dimensão máxima (Mitchell et al., 1983, *in* Pim et al. 2008).

A origem deste vulcanismo é atribuída à presença de um *hotspot*. Este termo *hotspot* foi proposto por Morgan em 1971, que explicava estas cadeias de vulcões como sendo a manifestação à superfície de plumas convectivas ascendentes a partir do manto inferior. Associado a este conceito de *hotspot*, surge o problema da interacção da pluma ascendente com a placa litosférica. O resultado desta interacção tem como expressão superficial uma anomalia batimétrica (*swell*) com dimensões típicas de 1200 km de largura, geralmente associada a anomalias de geóide e a fluxos de calor anómalos (Crough, 1978).

A modelação do processo de aquecimento da litosfera para o *swell* Cabo Verdiano realizada por Courtney & White (1986), levou estes autores a concluir que uma fonte térmica litosférica não pode ser o único mecanismo causador das anomalias batimétricas e de geóide desta região. Brink & Brocher (1987) e Morgan et al. (1995) defendem, nos respectivos trabalhos, que o *swell* observado se deve à interacção entre uma pluma ascendente e a litosfera.

A interpretação de perfis de reflexão sísmica realizada por Ali et al. (2003a), sugere uma espessura elástica (T_e) na vizinhança do arquipélago de 29 km. Estes resultados para a espessura elástica são semelhantes aos obtidos em trabalhos anteriores de, por exemplo, McNutt (1988) e Clamant et al. (1990).

Estas determinações da espessura elástica da litosfera na região de Cabo Verde revelaram que essa espessura não pode ser explicada apenas pela pressão litoestática. Por sua vez, a anomalia de fluxo de calor sugere que a anomalia topográfica não pode ser totalmente explicada pelo re-aquecimento da litosfera devido à presença de um *hotspot*, sugerindo a presença de outros processos mantélicos mais profundos.

Contudo, ainda que Cabo Verde apresente um vulcanismo activo e um dos maiores *swell* encontrados em regiões oceânicas, a sua origem em profundidade e a sua expressão lateral continuam a ser tema de debate.

A sismologia é uma ferramenta fundamental na caracterização da estrutura da crosta. Os trabalhos de refração sísmica conduzidos por Dash et al. (1976) permitiram mapear a Moho a 16-17 km de profundidade.

Em 2006, Lodge e Helffrich, analisaram funções receptoras P_s , calculadas a partir dos dados da rede temporária de 7 estações de banda larga em diferentes ilhas do arquipélago e da estação SACV (Global Seismograph Network, GSN – IRIS/IDA). Mediram também a bi-refrangência (*splitting*) das fases SKS, SKKS e PKS registadas nas diferentes estações.

Segundo Lodge & Helffrich (2006) a anisotropia observada sugere a presença de material de baixa densidade sob o *swell*, cujo fluxo é não radial. Afirmam ainda que um rejuvenescimento térmico não é compatível com as elevadas velocidades sísmicas encontradas sob o arquipélago (figura 2.3).

Assim, o modelo de velocidades obtido, que se apresenta na figura 2.3, revela uma crosta cuja espessura aumenta de Oeste para Este, atingindo os 22km sob a ilha de Maio. Este aumento de espessura está de acordo com a progressão de idades dos afloramentos analisados nas ilhas. Verifica-se igualmente um aumento da velocidade das ondas P de Oeste para Este. O manto superior apresenta velocidades elevadas e baixas densidades. A cerca de 80 km de profundidade surge uma camada de baixa velocidade. Lodge e Helffrich interpretam estes resultados como sendo devidos à fusão no *hotspot* que vai espessar a crosta e, simultaneamente, provocar um espalhamento da raiz do *swell*.

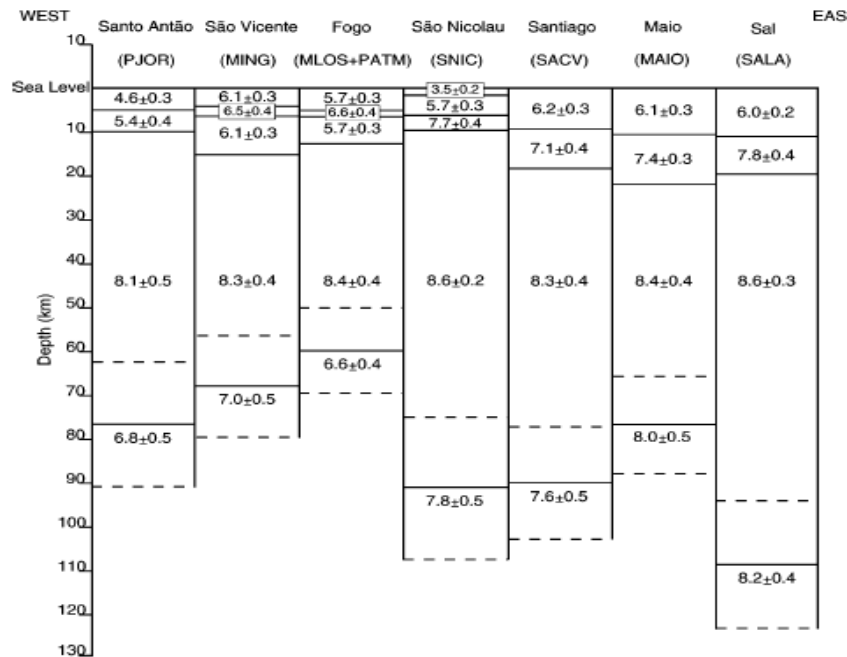


Figura 2.3 - Estrutura da crosta e do manto superior sob todas as estações, de Oeste para Este. Os valores apresentados são velocidades das ondas P, em km/s. Retirado de Lodge & Helffrich (2006).

Mais recentemente Pim et al. (2008), a partir da análise de perfis de reflexão *wide-angle*, determinaram a estrutura da crosta e do manto superior ao longo de uma linha de ~440 km que atravessa o arquipélago (figura 2.4). A modelação efectuada revelou a presença de uma crosta normal com ~7 km de espessura entre as ilhas, com uma ligeira flexão devida à carga dos edifícios vulcânicos.

A camada de sedimentos tem uma espessura de 1 a 2 km e velocidades entre 1.68 e 4.95 km/s. A crosta onde as ilhas estão implantadas aparenta ser uma crosta oceânica normal, com uma espessura de ~7.5 km, sendo as velocidades da crosta superior e da crosta inferior, 4.90 – 5.20 km/s e 6.40 – 7.10 km/s, respectivamente. A análise de dados gravimétricos é coerente com os resultados encontrados para a crosta superficial, mas não permite definir a profundidade da Moho. Os modelos de velocidade não evidenciam a presença de *underplating* ou de um manto superior de baixa densidade.

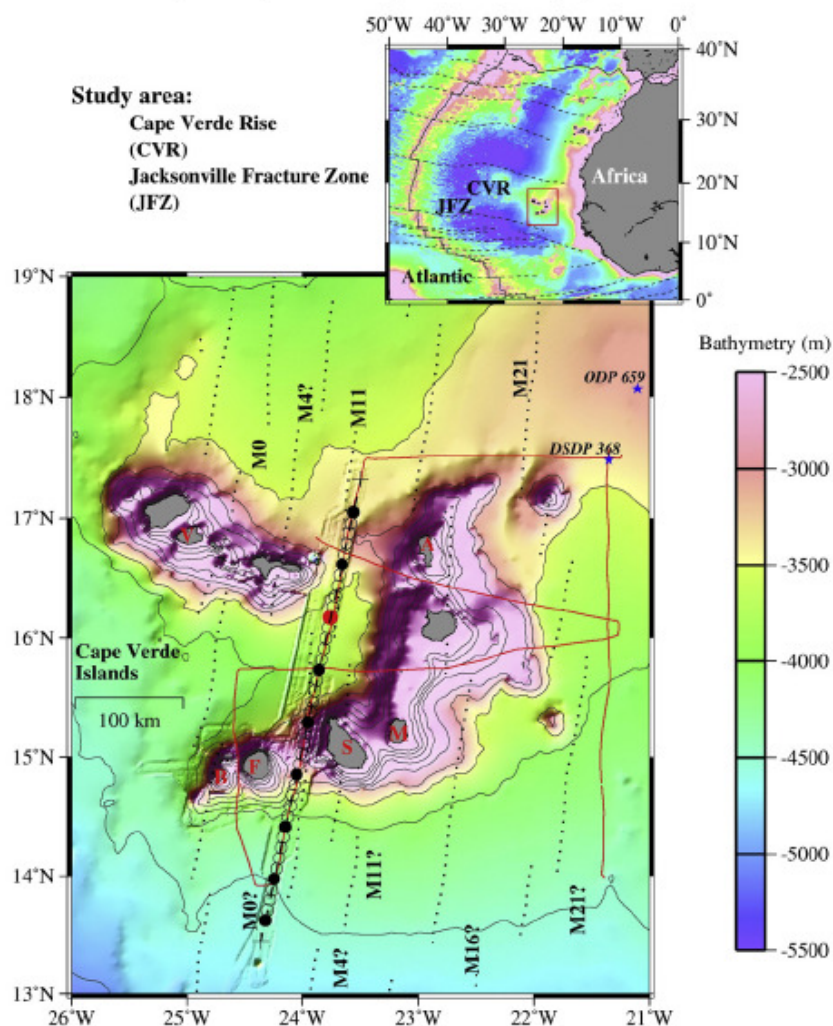


Figura 2.4 - Localização do perfil *wide-angle*. As linhas marcadas com pontos representam as anomalias magnéticas M0 a M21. As linhas a vermelho correspondem aos perfis sísmicos dos trabalhos Ali et al. (2003a, b). O perfil *wide-angle* foi feito entre as duas cruzes a preto. Os círculos não preenchidos e o círculo vermelho são OBS, enquanto que os círculos a preto mostram a localização dos instrumentos utilizados neste trabalho. A batimetria apresentada é a GEBCO 1 (<http://www.gebco.net/>). Retirado de Pim et al. (2008).

A estrutura profunda sob Cabo Verde tem uma assinatura importante em muitos dos modelos tomográficos globais e regionais. O modelo obtido por Montelli et al. (2004), a partir da análise das ondas P, revela, sob Cabo Verde, a presença de uma anomalia negativa com um raio de 200 – 400 km e uma extensão em profundidade de 1900 km. A falta de resolução não permite seguir esta anomalia a maiores profundidades. A anomalia negativa sob Cabo Verde parece ligar-se aos 1900 km de profundidade com as anomalias associadas aos Açores e às Canárias, formando uma anomalia de maiores dimensões. No entanto a baixa resolução no manto inferior não permite avaliar o seu comportamento.

Esta baixa resolução é igualmente apontada como justificação para a ausência de uma anomalia à superfície. No entanto, a ausência de uma anomalia negativa no topo do manto superior tinha já sido observada noutros modelos tomográficos obtidos com técnicas diferentes (Grand et al., 1997; Mégnin & Romanowicz, 2000). O modelo regional para o oceano Atlântico deduzido por Silveira & Stutzmann (2002) apresenta anomalias de baixa velocidade sob a maior parte dos *hotspots*, incluindo Cabo Verde.

3 Metodologia

Um dos objectivos da geofísica e, em particular, da sismologia, é a caracterização da estrutura interna actual do nosso planeta. Conjugando com os resultados da geoquímica e da geodinâmica, que por sua vez estudam os processos integrados no tempo, é possível reconstituir a história da Terra, mas sempre com uma resolução espacial limitada.

A energia libertada num sismo propaga-se sob a forma de diferentes tipos de ondas. As ondas P e S, designadas por ondas volúmicas, propagam-se pelo interior da Terra e apresentam velocidades mais elevadas sendo, portanto, as primeiras a serem detectadas numa estação sísmica. A partir do momento que as ondas volúmicas atingem a superfície, formam-se ondas superficiais, por interferência construtiva e destrutiva da energia que permanece canalizada entre as diferentes interfaces do globo terrestre. Se se assumir um modelo de Terra com simetria hexagonal (transversalmente isotrópico), as ondas superficiais dividem-se em ondas transversais (Love) e radiais (Rayleigh).

A sismologia permite determinar as velocidades de propagação dos vários tipos de ondas que se propagam no interior da Terra. Estas velocidades são funções dos parâmetros elásticos do meio e da densidade que, por sua vez, são funções da mineralogia e das condições termodinâmicas do meio atravessado (pressão e temperatura).

Alguns dos métodos utilizados para determinar a estrutura sísmica da Terra, em particular os métodos tomográficos, baseiam-se num princípio simples: a determinação das velocidades de propagação das ondas sísmicas para um elevado número de pares sismo – estação e a posterior procura do modelo que melhor explique as velocidades encontradas. A resolução dos modelos assim obtidos, depende não só do tipo de ondas utilizado, mas também da geometria sismo – estação.

Nos anos 50, Aki (1957) propôs a utilização do ruído sísmico ambiente para medir a dispersão das ondas Rayleigh e Love nas camadas mais superficiais. Mas, foi em 2004 que Shapiro e Campillo mostraram, pela primeira vez, a presença de ondas superficiais nas correlações cruzadas entre pares de estações distanciadas de algumas centenas de quilómetros.

Nos pontos seguintes deste capítulo far-se-á uma breve descrição da metodologia utilizada na obtenção das velocidades de grupo das ondas Rayleigh, a partir do ruído sísmico ambiente. Nesta descrição começa-se por explicar as funções de Green que nos permitirão determinar as velocidades de grupo. Posteriormente, referem-se as vantagens da utilização do ruído sísmico ambiente e os diferentes passos realizados para a obtenção das funções de Green. Por último, descreve-se o método para estimar as velocidades de grupo, determinadas após a obtenção dos diagramas de energia.

3.1 Determinação das funções de Green a partir de um campo de ondas aleatório

Chama-se função de Green g_0 (também designada por resposta impulsiva) à solução particular da equação de onda para uma fonte impulsiva, com as seguintes condições limites:

$$\begin{cases} g_0(\vec{r} \rightarrow \infty) = 0 \\ g_0(t = 0) = 0 \\ \frac{\partial g_0}{\partial t}(t = 0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Tem-se então a equação de onda:

$$\left[\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} \right] g_0(\vec{r}, t) = \delta(\vec{r}) \delta(t) \quad (2)$$

Nesta definição matemática, a função de Green não foi especificada para qualquer grandeza física. Poder-se-ão, por exemplo, definir diferentes grandezas físicas, consoante g_0 represente um deslocamento, uma velocidade ou uma aceleração e a fonte seja um impulso em deslocamento, velocidade ou aceleração.

Os estudos de Weaver & Lobkis (2001, 2004) mostraram que é possível extrair a função de Green, entre dois pontos a partir de um campo de ondas difuso ou aleatório. Para explicar como se pode obter uma função de Green a partir de um campo de ondas, Larose et al (2004) consideraram dois receptores localizados em dois pontos A e B e uma fonte S. Consideremos que g_{AB} é a função de Green entre A e B e $e(t)$ é a função de excitação em S (ver figura 3.1). Nestas condições, o campo de ondas que chega em A é definido como:

$$e(t) \otimes g_{AS}(t) \quad (3)$$

e em B como:

$$e(t) \otimes g_{BS}(t) \quad (4)$$

onde o símbolo \otimes representa o produto de convolução.

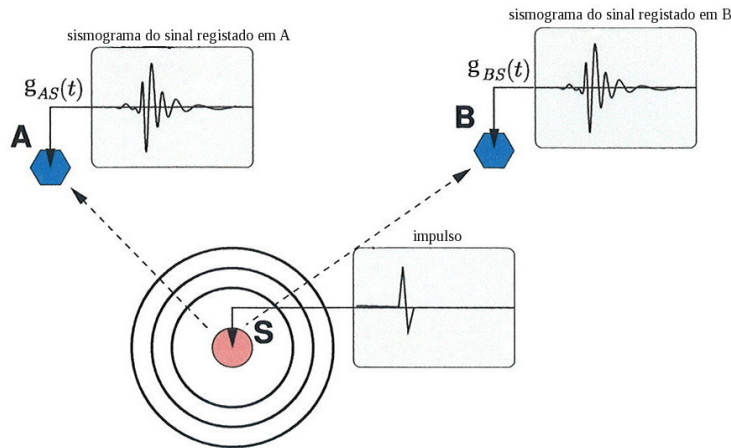


Figura 3.1 - Esquema explicativo da emissão de um sinal impulsivo da fonte S e recepção deste nos receptores A e B. $g_{AS}(t)$ e $g_{BS}(t)$ representam a função de Green entre A e S e entre B e S, respectivamente. Adaptado de Landès (2006).

A correlação cruzada de um campo de ondas que chega a A e B é definido como

$$C_{AB}(t) = g_{AS}(-t) \otimes g_{BS}(t) \otimes f(t) \quad (5)$$

onde

$$f(t) = e(t) \otimes e(-t) \quad (6)$$

Se o meio for estático, a propagação é recíproca, ou seja,

$$g_{AS}(t) = g_{SA}(t) \quad (7)$$

e a correlação também pode ser definida como:

$$C_{AB}(t) = g_{SA}(-t) \otimes g_{BS}(t) \quad (8)$$

Se imaginarmos uma experiência fictícia em que A envia um impulso que se propaga e chega a S como $g_{SA}(t)$, em S o sinal é invertido temporalmente e reenviado como $g_{SA}(-t)$. É então posteriormente registado em B como:

$$g_{SA}(-t) \otimes g_{BS}(t) \quad (9)$$

A partir da informação já referida em cima, conclui-se que o resultado da correlação da experiência fictícia é igual ao resultado da correlação dos registos em A e B de um impulso emitido por S (figura 3.2).

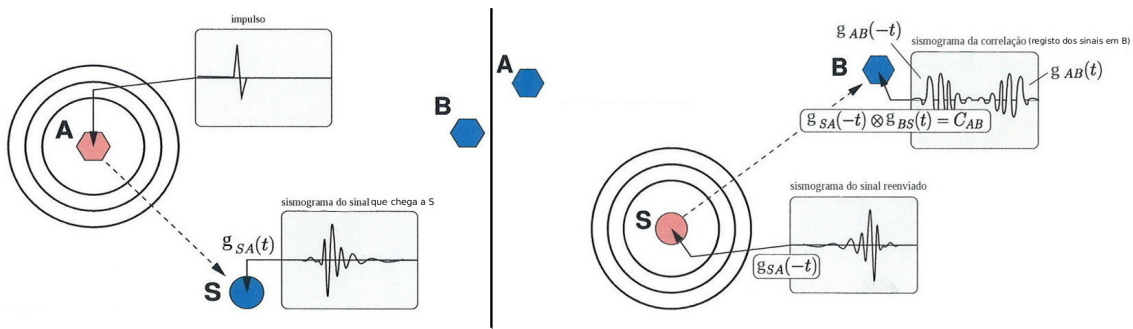


Figura 3.2 - Esquema explicativo da experiência fictícia descrita em cima. O lado esquerdo da figura é relativo à propagação do sinal de A para S. O lado direito é relativo ao reenvio do sinal de A e à recepção dos sinais em B. Adaptado de Landès (2006).

3.2 Análise do ruído sísmico ambiente

Shapiro & Campillo (2004) realizaram correlações cruzadas entre pares de estações, utilizando registos de banda larga de ruído sísmico ambiente. Estes investigadores concluíram que a análise do ruído sísmico ambiente apresenta vantagens em relação aos métodos de análise tradicionais, podendo-se citar estas quatro:

- As medidas podem ser realizadas para qualquer direcção de propagação e não estão limitadas à geometria sismo-estação;
- não dependem da localização da fonte;
- a zona de sensibilidade destas medições situa-se na região que fica entre as duas estações;
- pode-se analisar pequenos períodos se existirem estações relativamente próximas umas das outras.

Analisando a figura 3.3, é possível verificar uma vantagem importante do ruído sísmico ambiente: é possível adquirir registos contínuos em qualquer lugar do globo.

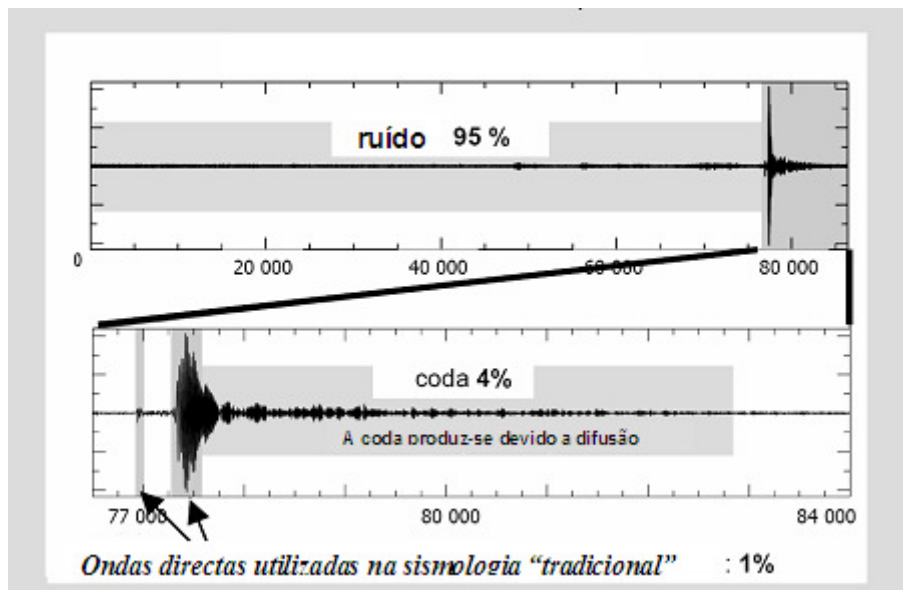


Figura 3.3 – Registo instrumental obtido durante um dia: é possível comparar a quantidade de registos de ruído sísmico ambiente possíveis, face a um único evento sísmico. Adaptado de Gouédard (2008).

Shapiro & Campillo (2004) afirmam que quando se utiliza dados de ruído sísmico ambiente de um longo período de tempo, o ruído pode ser considerado como sendo um campo de ondas aleatório, donde se pode obter funções de Green. Para o testar, seleccionaram um período relativamente calmo ao nível de actividade sísmica mundial, entre o dia 1 de Janeiro de 2002 e 2 de Agosto do mesmo ano, durante o qual não ocorreram sismos de grande magnitude ($M \geq 7$). Recolheram todos os registos contínuos de componente vertical disponíveis nas estações ANMO e CCM (figura 3.4a) e utilizam-nos para calcular a correlação cruzada para diferentes bandas de período (figura 3.4b).

Para comparar as características de dispersão do sinal emergente com aqueles que podem ser medidos para o mesmo trajecto das ondas directas, os autores calcularam uma correlação cruzada de banda larga (0,008 – 0,07Hz) e aplicaram-na a uma análise tempo/frequência, obtendo assim a curva de dispersão da velocidade de grupo. Nesta comparação, verificaram que os resultados obtidos para os dois casos são semelhantes.

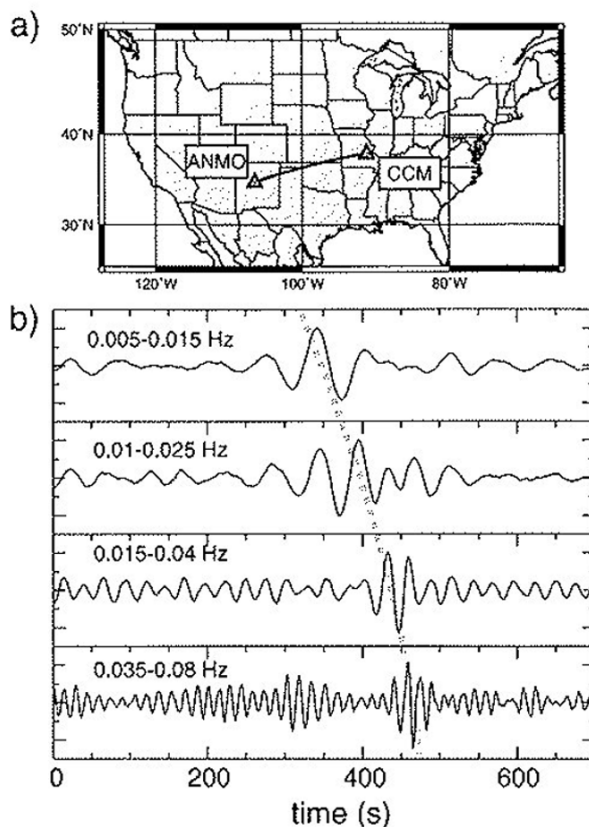


Figura 3.4 - (a) Localização das estações ANMO e CCM. (b) Correlação cruzada para diferentes bandas de frequência, assinaladas nos respectivos gráficos. A linha a pontado salienta a dispersão do sinal, verificando-se que a chegada das pequenas frequências (longos períodos) é anterior à das grandes frequências (curtos períodos). Retirado de Shapiro & Campillo (2004).

3.2.1 Normalização no domínio do tempo

Segundo Bensen et al (2007), de entre a maioria das complicações na automatização do processamento de dados, os sismos são os mais significativos. Estes ocorrem irregularmente e embora os tempos e localizações de sismos grandes possam ser encontrados em catálogos sísmicos, muitos dos pequenos sismos que ocorrem por todo o globo não se encontram nos catálogos globais. Além disso, o tempo de chegada das fases das ondas superficiais para pequenos períodos não é bem conhecido. Assim, a remoção de sinais de sismos devem ser realizada automaticamente, de modo a não ser necessário recorrer a catálogos.

Na perspectiva de eliminar estas complicações realiza-se uma normalização no domínio do tempo. Este procedimento elimina os efeitos dos sismos, das irregularidades instrumentais e das fontes de ruído não estacionário perto de estações.

Bensen et al (2007) expõem vários métodos para normalizar no domínio do tempo, de entre os quais a normalização a 1-bit e a normalização da média deslizando.

A normalização a 1-bit é a mais agressiva e consiste em reter apenas o sinal (- ou +) do valor da amplitude do ruído, pela substituição de todas as amplitudes positivas por +1 e as negativas por -1. Esta substituição do valor das amplitudes pode ser conseguida através da divisão do valor da amplitude do ruído pelo seu valor absoluto,

$$\tilde{d}_n = \frac{d_n}{|d_n|} \quad (10)$$

Esta normalização tem mostrado aumentar a razão sinal/ruído, quando usado em experiências laboratoriais em acústica (Larose et al 2004) e tem sido usado em alguns estudos sísmicos de ondas coda e ruído sísmico ambiente (Shapiro & Campillo 2004; Shapiro et al 2005; Yao et al 2006). Um exemplo da aplicação desta normalização é o que se pode observar na figura 3.5. Esta figura compara o ruído sísmico ambiente antes (em cima) e depois (em baixo) da aplicação da normalização a um 1-bit, verifica-se que esta normalização elimina eficazmente os efeitos referidos anteriormente.

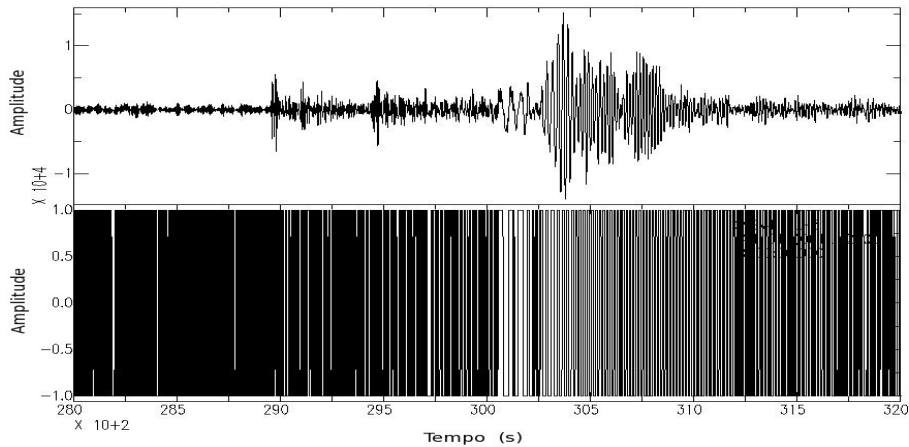


Figura 3.5 - Exemplo da aplicação da normalização a 1-bit para a estação CVS4 no dia 16 de Dezembro de 2007. Em cima observa-se o ruído sísmico ambiente antes da aplicação da normalização a 1-bit, onde se pode verificar a ocorrência de um evento sísmico. Em baixo mostra-se o resultado após a normalização, verificando-se a eficaz eliminação do efeito do sismo.

A normalização da média deslizante, calcula a média deslizante do valor absoluto do ruído numa janela de normalização com largura fixa $(2N+1)$ como sendo o peso da normalização w_n ,

$$w_n = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=n-N}^{n+N} |d_j| \quad (11)$$

obtendo-se dados normalizados dividindo o valor do ruído pelo seu peso de normalização,

$$\tilde{d}_n = \frac{d_n}{w_n} \quad (12)$$

a largura da janela de normalização determina a quantidade de informação da amplitude que é retirada. No caso em que a largura da janela de normalização é 1 ($N=0$), esta normalização é equivalente a uma normalização a 1-bit, enquanto que no caso de uma largura muito grande ($N \rightarrow \infty$) o valor normalizado aproxima-se do valor original. Um exemplo da aplicação da normalização da média deslizante é o que mostra a figura 3.6. Nesta figura pode-se observar em cima o registo do ruído sísmico ambiente antes da aplicação desta normalização e em baixo o resultado após a normalização, verificando-se que a normalização da média deslizante elimina eficazmente os efeitos referidos anteriormente.

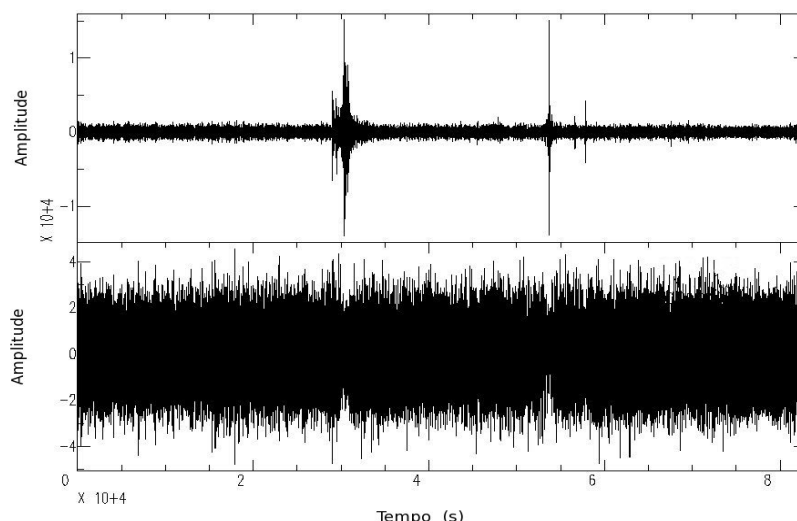


Figura 3.6 - Exemplo da aplicação da normalização para a estação CVSV4 no dia 16 de Dezembro de 2007. Em cima observa-se o ruído sísmico ambiente antes da aplicação da normalização da média deslizante, onde se pode verificar a ocorrência de um evento sísmico. Em baixo mostra-se o resultado após a normalização, verificando-se a eficaz eliminação do efeito do sismo.

Analisando as figuras 3.5 e 3.6 (apresentadas em cima), verifica-se que ambas as normalizações são eficazes na eliminação de efeitos de sismos de entre outros. Por este motivo, não foi considerado necessário utilizar a normalização mais agressiva (a 1-bit), utilizando-se apenas a normalização da média deslizante.

3.2.2 Normalização no domínio da frequência

O ruído sísmico ambiente não é branco no domínio da frequência, ou seja, tem frequências que se destacam. Este apresenta um pico aproximadamente nos 15s de período, outro pico aproximadamente nos 7.5s de período e um crescimento para os longos períodos aproximadamente acima dos 50s. Para além destes picos, existe um outro mais pequeno aproximadamente nos 26s de período que é causado por uma fonte de ruído persistente do Golfo da Guiné. Este sinal é sazonal, sendo mais forte no Verão do Hemisfério Norte que no Inverno. Normalmente o pico dos 26s é obscurecido pelos sismos, tornando-se visível após a aplicação da normalização temporal. O ruído sísmico ambiente é mínimo aproximadamente entre os períodos 30s e 70s.

A normalização no domínio da frequência procura alisar o ruído no ponto de vista espectral. Para isso é necessário que a normalização elimine os diferentes picos espectrais referidos em cima, ampliando a banda do ruído sísmico ambiente. O espectro normalizado é produzido a partir da inversão ponderada do espectro por uma versão alisada do espectro de amplitude. Um exemplo do resultado da aplicação da normalização espectral está representado nas figuras 3.7 e 3.8. Em ambas as figuras compara-se o ruído sísmico ambiente antes (em cima) e depois (em baixo) da aplicação do branqueamento espectral. Na figura 3.7, a comparação dos resultados é feita em função da frequência, observando-se assim as amplitudes espectrais, enquanto que na figura 3.8 é feita em função do tempo. Após a aplicação da normalização só são considerados os dados relativos à banda de períodos entre 5 e 150 segundos, por a maioria do sinal do ruído estar compreendida nestas bandas, como se pode verificar no gráfico de cima da figura 3.7.

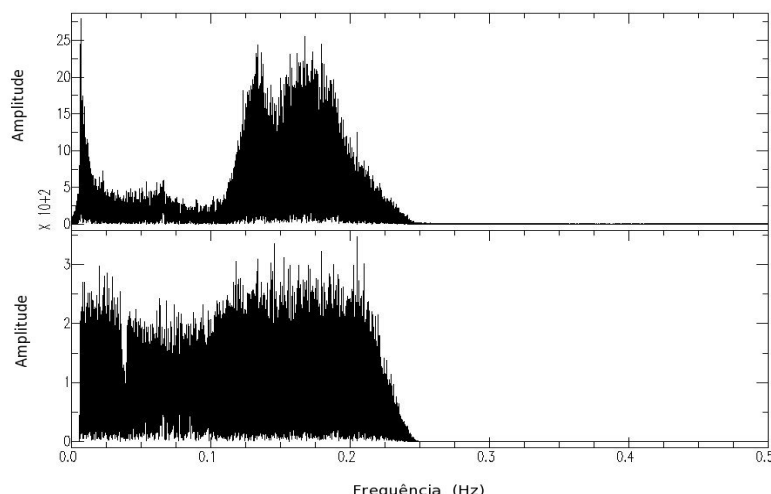


Figura 3.7 - Exemplo da aplicação do branqueamento espectral para a estação CVSV4 no dia 16 de Dezembro de 2007. Nesta figura são representados os espectros do ruído, ou seja, amplitude em função da frequência ou do período. Em cima observa-se o ruído sísmico ambiente (temporalmente normalizado) antes da aplicação da normalização espectral. Em baixo encontra-se o resultado após a aplicação da normalização, verificando-se assim a eficácia da normalização. Neste último gráfico (ruído espectralmente normalizado), só é representado os resultados da banda de períodos entre 5 e 150 segundos (aproximadamente entre 0.007 e 0.2 Hz), decaindo exponencialmente até ao valor zero, a partir desses valores limite da banda.

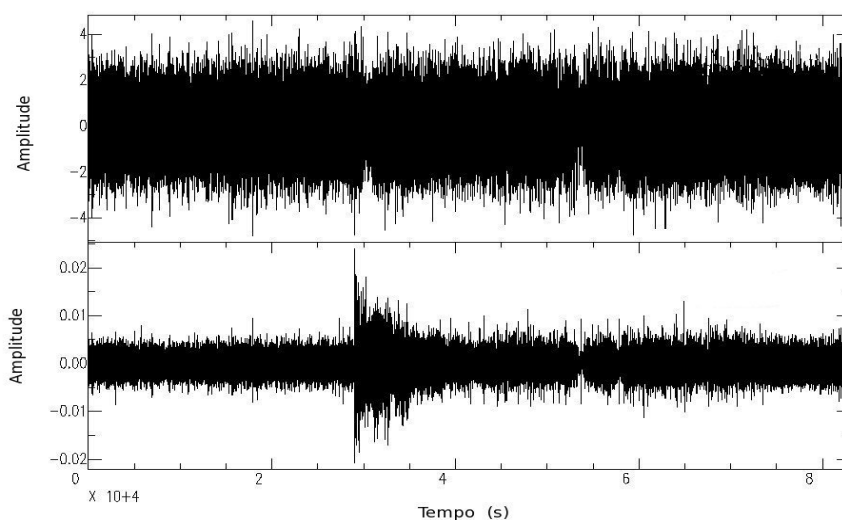


Figura 3.8 - Exemplo da aplicação do branqueamento espectral para a estação CVSV4 no dia 16 de Dezembro de 2007. Nesta figura são representados os mesmos resultados que a figura anterior mas neste caso em função do tempo. Em cima observa-se o ruído sísmico ambiente (temporalmente normalizado) antes da aplicação da normalização espectral. Em baixo encontra-se o resultado após a aplicação da normalização.

3.2.3 Correlação Cruzada

A correlação cruzada consiste no somatório das várias multiplicações dos registos para diferentes desfasamentos, como se pudéssemos deslizar um registo sobre o outro. Deste modo a correlação cruzada tem dois lados, a parte positiva do desfasamento e a parte negativa do desfasamento. A parte positiva do desfasamento é por vezes designada como a parte causal e a parte negativa do desfasamento como a parte anti-causal. Estas duas partes representam o viajar das ondas em duas direcções opostas entre as estações dos registos correlacionados. Segundo

Bensen et al (2007), se as fontes de ruído sísmico ambiente se distribuírem de forma homogênea em azimuth, a parte causal e a parte anti-causal serão idênticas. No entanto se existirem assimetrias nas amplitudes e no conteúdo espectral serão indicativas de diferenças no processo de origem e na direcção radial da fonte.

Matematicamente a correlação cruzada corresponde à seguinte equação

$$C_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n+l).y(n) \quad (13)$$

onde x e y representam os registos que foram correlacionados e l representa o atraso ou desfaseamento de x em relação a y para o cálculo da correlação. Na figura 3.9 pode-se observar um exemplo de uma correlação cruzada entre as estações CVSL2 e CVST1 (ilhas Sal e Santiago, respectivamente) para o mês de Dezembro.

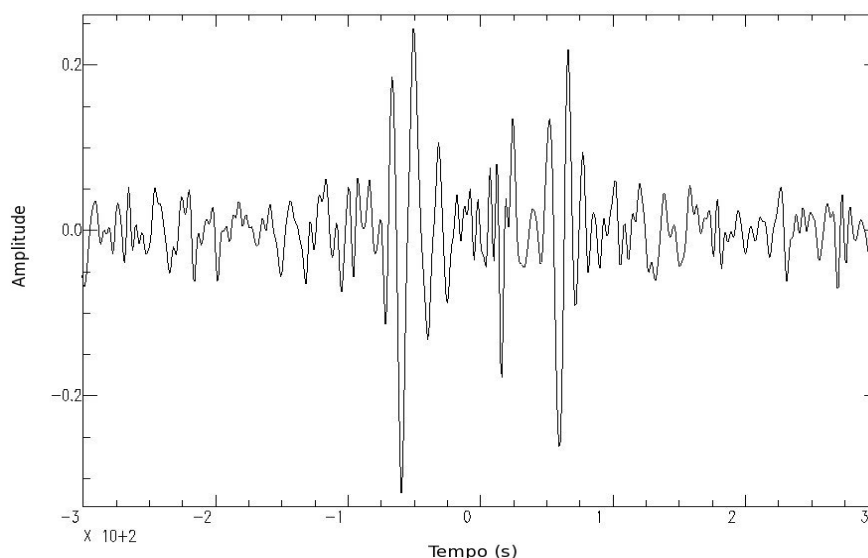


Figura 3.9 - Correlação cruzada entre as estações CVSL2 e CVST1 (correspondentes às ilhas Sal e Santiago) para o mês de Dezembro.

Ao correlacionarmos os registos diários obtêm-se uma correlação para cada dia e para cada par de estações. Com o intuito de melhorar a razão sinal ruído, realizou-se o *stack*, obtendo deste modo, uma correlação para cada par de estações. O *stack* consiste na soma de dados de todos os dias, do período em estudo, para um determinado par de estações, de forma a obter-se uma única correlação por cada par de estações para um ano ou outra duração temporal que se pretenda estudar, ou seja, uma função de Green para cada par de estações possíveis de combinar.

3.3 Análise Tempo/Frequência das Funções de Green

3.3.1 Conceitos Gerais

No interior da Terra propagam-se diferentes ondas, de entre as quais as ondas volúmicas e as ondas superficiais. As ondas superficiais propagam-se paralelamente à superfície da Terra, sendo progressivas segundo o plano horizontal e estacionárias com a profundidade. Estas ondas constituem o pacote mais energético, aparecendo a seguir às ondas P e S, quando observamos um sismograma de banda larga. As ondas P são compressivas e as primeiras a chegar, as ondas S são cisalhantes, sendo ambas ondas volúmicas.

Existem dois tipos de ondas superficiais, as ondas Love e as ondas Rayleigh. As ondas Love correspondem às reflexões múltiplas da componente horizontal das ondas S (ondas SH), são ondas transversais e a partícula representativa do meio onde a energia se propaga move-se perpendicularmente à direcção de propagação da onda. As ondas Rayleigh correspondem ao resultado construtivo das interferências entre as ondas P e a componente vertical das ondas S (ondas SV) e a partícula representativa do meio onde a energia se propaga move-se elipticamente num plano vertical paralelo à direcção de propagação da onda. Devido às suas características, serem bastante energéticas e terem frequências baixas, as ondas superficiais atenuam-se muito lentamente, chegando a dar várias voltas à Terra. A velocidade destas ondas depende da frequência, ou seja, as ondas são dispersivas.

A dispersão das ondas é quantificada especificando uma ou duas velocidades (ou uma velocidade e uma constante) para cada frequência. Estas duas velocidades são chamadas velocidade de fase e velocidade de grupo, que podem ser medidas a partir de sismogramas e são sensíveis à estrutura das rochas que atravessam. A velocidade de grupo é a velocidade à qual a energia viaja e que pode ser usada para prever o tempo de chegada das ondas superficiais para uma determinada frequência. A velocidade de fase é a velocidade que descreve a fase das ondas a uma determinada distância da fonte e que é sensível à profundidade e geometria da fonte.

A velocidade de grupo é definida por

$$U(\omega) = \frac{d\omega}{dk} \quad (14)$$

enquanto que a velocidade de fase é definida por

$$c(\omega) = \frac{\omega}{k} \quad (15)$$

em que ω é a frequência angular e k o número de onda. Na figura 3.10 é possível observar a dependência das velocidades nos períodos, que também se pode observar nas equações 14 e 15, se nos lembrarmos que a frequência é definida por:

$$\omega(T) = \frac{2\pi}{T} \quad (16)$$

Segundo Lay & Wallace (1995), a velocidade de grupo depende da velocidade de fase e da variação da velocidade de fase com o comprimento de onda. Esta dependência é visível na equação (equação 17) que relaciona a velocidade de grupo com a velocidade de fase.

$$U = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc)}{dk} = c \frac{dk}{dk} + k \frac{dc}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} \quad (17)$$

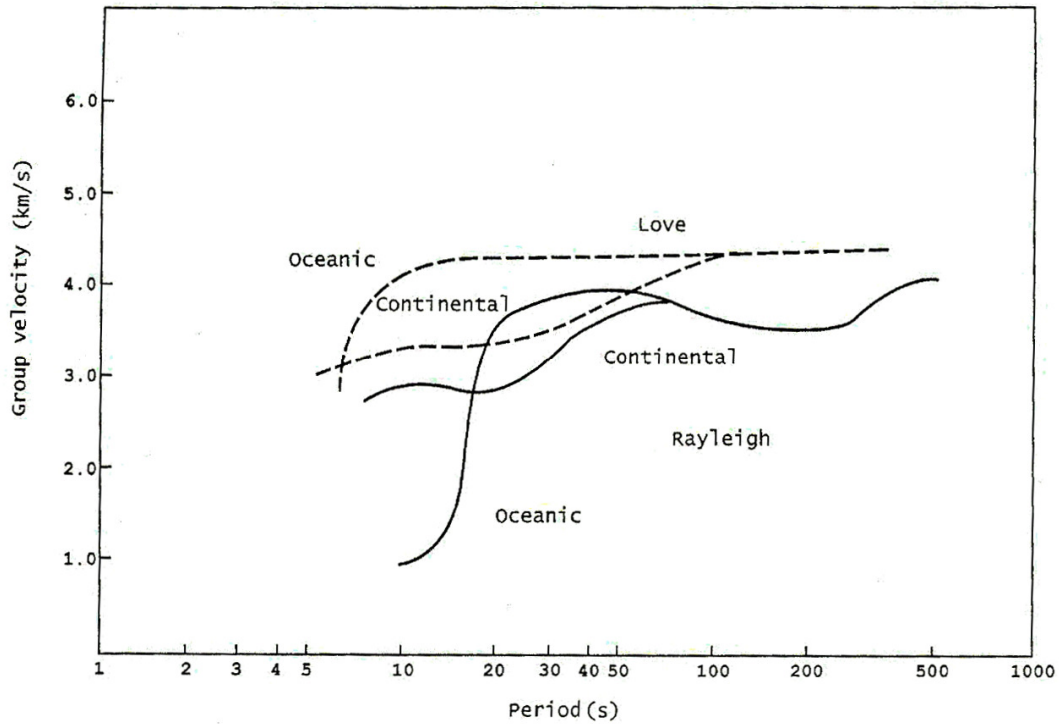


Figura 3.10 - Curvas de dispersão das velocidades de grupo. As linhas sólidas representam a velocidade de grupo para as ondas Rayleigh, enquanto que as linhas a pontilhado representam a velocidade de grupo para as ondas Love. Nesta figura é possível observar, não só a dependência das velocidades de grupo nos períodos, como também a forma que normalmente as curvas de dispersão adquirem. Nesta figura observa-se grandes diferenças entre ondas que viajam ao longo de trajectos sobre os oceanos e ondas que viajam sobre continentes. Retirado de Udías (1999).

3.3.2 Diagramas de Energia e Velocidades de Grupo

Realizando a análise tempo/frequência obtêm-se diagramas de energia e curvas de dispersão da velocidade de grupo. Nesta análise utilizou-se o método de filtragem múltipla. Dziewonski & Landisman (1970) afirmaram que o princípio do método de filtragem múltipla é baseado numa filtragem do registo original com filtros Gaussianos e na determinação dos valores da amplitude para cada instante. Este método considera que o tempo necessário para a envolvente do sinal filtrado $h_n(t)$ atingir a sua amplitude máxima corresponde ao tempo de percurso do grupo de ondas com frequência ω_n (Dziewonski et al., 1972). Deste modo, pode-se estimar a velocidade de grupo de acordo com a seguinte equação

$$U(\omega) = \frac{r}{t(\omega)} \quad (18)$$

onde $U(\omega)$ é a velocidade de grupo, $t(\omega)$ é o tempo de viagem do grupo e r é a distância epicentral, que neste estudo corresponde à distância entre o par de estações correlacionadas.

O sinal filtrado resultante da aplicação do filtro Gaussiano num sinal dispersivo, pode ser definido por

$$h_n(t) = \int_{-\alpha}^{\alpha} |F(\omega)| \exp \left[-\alpha \left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \right)^2 \right] \cos(kr - \alpha t) d\omega \quad (19)$$

onde $|F(\omega)|$ é a função amplitude, α é o coeficiente que determina a largura do filtro, ω_n é a frequência central do filtro e $k(\omega)$ é o número de onda dependente da frequência ω .

4 Os Dados

No âmbito do projecto CV-PLUME (referência PTDC/CTE-GIN/64330/2006) instalou-se no arquipélago de Cabo Verde, entre Novembro de 2007 e Setembro de 2008, uma rede temporária de 40 estações de banda larga.

Esta rede pertence à rede de estações móveis do GFZ (GeoForschungsZentrum de Potsdam) e a sua utilização foi possível graças à parceria estabelecida entre o IDL e o GFZ.

A distribuição geográfica das estações pelo arquipélago pode ser vista na figura 4.1. As tabelas A.1 e A.2 (em anexo) resumem toda a informação sobre essa mesma distribuição, nomeadamente a localidade, código atribuído, coordenadas e período de operação.

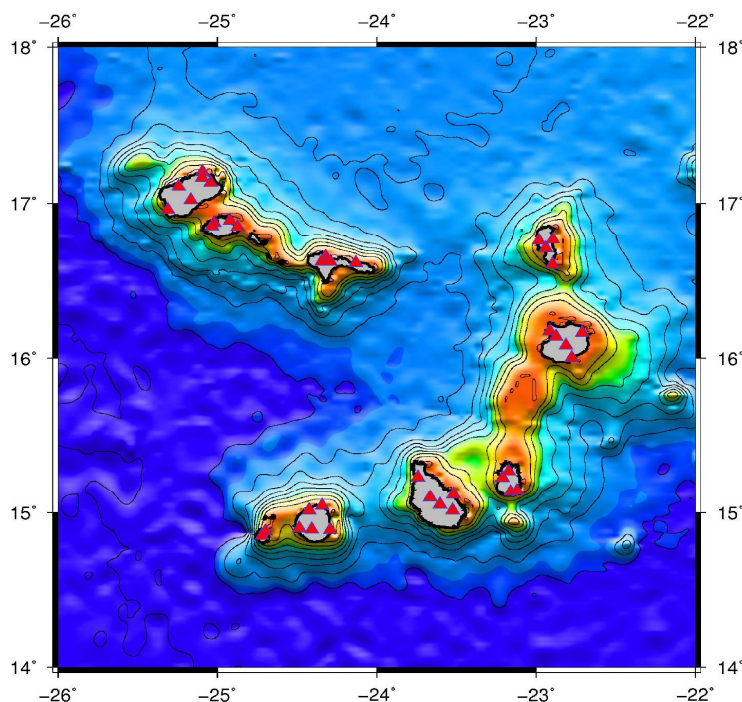


Figura 4.1 - Localização das 39 estações que estiveram a operar em Cabo Verde entre Novembro de 2007 e Setembro de 2008.

Por questões de segurança, e prevendo eventuais actos de vandalismo, infelizmente comuns em algumas ilhas, optou-se por instalar grande parte das estações no interior dos postos de transformação (PT) da Electra (companhia de electricidade da República de Cabo Verde). Infelizmente, a estação instalada na ilha da Boa Vista nas proximidades da Povoação Velha foi roubada.

Cada uma das estações era constituída por um sismómetro CMG40T (Guralp) e por um sistema de aquisição Earth Data Logger (EDL). A alimentação foi feita usando a rede eléctrica local, no caso das estações instaladas nos PT, ou através de painéis solares, no caso das estações de ar livre. Em qualquer dos casos foram usadas baterias de gel como *backup*. O registo dos dados foi feito em discos rígidos que podiam ser facilmente trocados sem que a estação interrompesse o seu registo. Todas as estações ficaram a registar em contínuo a uma taxa de 100 Hz.

Os dados apresentavam-se inicialmente em formato MSeED, fragmentados em janelas de 30 minutos. Foram concatenados em janelas de 24 horas e, recorrendo aos ficheiros DATALESS, convertidos em formato SEED. Para esse efeito foram utilizados os programas

mseed2sac, sac2mseed e rdseed disponíveis na página do consórcio IRIS. Os ficheiros em SEED foram então convertidos em SAC, construindo-se simultaneamente os ficheiros com as funções de transferência de cada estação.

A Global Seismograph Network (GSN – IRIS/IDA) instalou em Julho de 2000 uma estação sísmica de banda larga permanente com o código de estação SACV e de rede II, na ilha de Santiago do arquipélago de Cabo Verde. A estação está localizada à latitude 14.97N, à longitude 23.61W e elevação de 387 metros.

Esta estação está equipada com um sismómetro, Guralp CMG-3T, instalado a 7 metros de profundidade registando em contínuo nos canais BHE, BHN e BHZ a uma taxa de aquisição de 40 Hz. A uma profundidade de 97 metros está instalado um segundo sismómetro, Geotech KS-54000, a registar igualmente em contínuo nos canais BHE, BHN, BHZ, LHE, LHN e LHZ a uma taxa de aquisição de dados de 20 Hz (BH) e de 1 Hz (LH).

Pensou-se, numa fase inicial incluir a estação SACV neste trabalho, utilizando os dados do sensor instalado à superfície (a 7 metros). Como se poderá verificar na base de dados do consórcio IRIS (www.iris.edu), SACV esteve inoperacional desde 21 de Dezembro de 2004 até 28 de Maio de 2008 e praticamente todo o mês de Agosto. Além disso, os registos de 2008 são bastante esparsos e apresentam lacunas de várias horas. Assim, optou-se por não se considerar esta estação sísmica.

Tendo em conta a distância entre as estações (entre as diferentes ilhas) e a consequente banda de períodos a analisar, os dados foram dizimados para a frequência de 1Hz. Todos os registos foram inspeccionados visualmente e foram retirados todos os dias em que os dados reflectiam mau funcionamento da estação ou falha de GPS.

A combinação das 39 estações, duas a duas, permite-nos obter 699 trajectos. No entanto, tendo em conta as distâncias entre estações em cada uma das ilhas, há que retirar 65 trajectos. Temos, portanto 634 trajectos. A figura 4.2 mostra a cobertura obtida com estes trajectos.

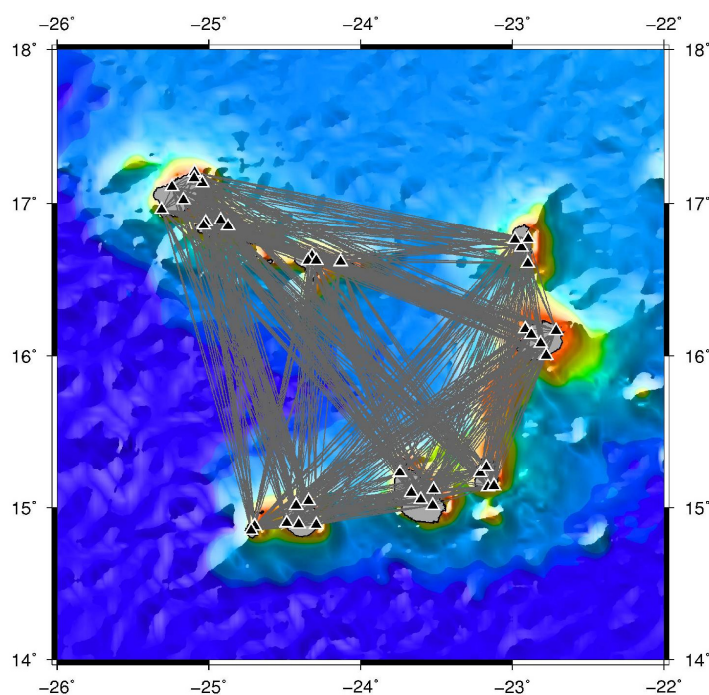


Figura 4.2 - Cobertura azimutal dos trajectos entre pares de estações.

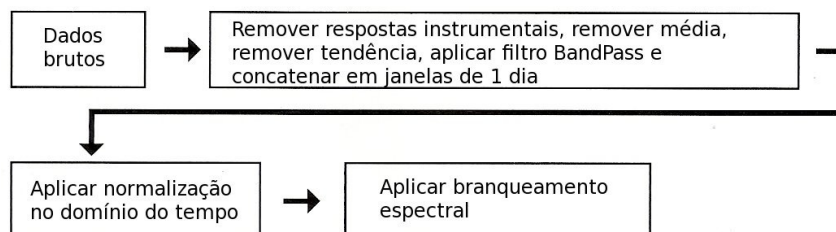
5 Processamento dos Dados de Banda Larga

Tal como é referido no capítulo anterior, os dados estavam inicialmente em formato MSEED (miniSEED – Data Only SEED Volumes). Este formato é uma versão simplificada do formato SEED. Os dados em formato MSEED contêm apenas o registo do sinal sem informações relativas à estação. Este tipo de informações denomina-se por metadados. Os ficheiros que contêm os metadados são os DATALESS. Os dados em formato SEED (the Standard for the Exchange of Earthquake Data) contêm os registos do sinal (como no formato MSEED) e os respectivos metadados.

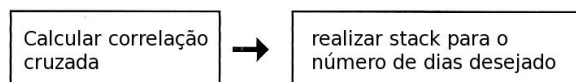
Ao se realizar o processamento dos dados foi necessário utilizar o software SAC. Por este motivo, converteu-se os dados para SAC. SAC (Seismic Analysis Code) é um programa desenvolvido para o estudo de registos de dados sísmicos. Neste estudo, decidiu-se organizar os dados em pastas de ano → mês → dia, por exemplo, os dados de todas as estações do dia 16 de Dezembro de 2007 estão dentro da pasta “2007_12_16_0_0_0” que está dentro da pasta “DEC” (abreviatura de December), que por sua vez está dentro da pasta “2007”. Todas as informações sobre MSEED, SEED, DATALESS e SAC referidas neste parágrafo e no anterior são baseadas no site do IRIS (www.iris.edu) e no manual SEED fornecido por este mesmo site.

Como é também referido no capítulo anterior, o pré-processamento dos dados inclui a dizimação dos dados para 1Hz, o preenchimento de lacunas do sinal com o valor zero e a remoção das respostas instrumentais. Nesta fase, decidiu-se excluir todos os dados que apresentavam ruído electrónico e outros efeitos devido a problemas instrumentais. Também foram excluídos todos os dados que correspondiam a dias em que constantemente a estação não tinha sinal de GPS. Para além destas exclusões, como apenas se pretendia estudar as ondas Rayleigh, considerou-se apenas a componente vertical (componente Z) do ruído sísmico ambiente. O processamento dos dados deste estudo baseia-se no trabalho de Bensen et al. (2007). Este procedimento encontra-se esquematizado na figura 5.1.

Fase 1:



Fase 2:



Fase 3:

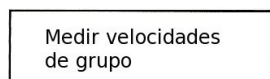


Figura 5.1 - Esquema das três primeiras fases do processamento de dados: a primeira fase consiste na preparação dos dados a analisar, de cada uma das estações; a segunda consiste no cálculo da correlação cruzada e no *stack* (empilhamento temporal) dos dados e a terceira consiste na determinação das curvas de dispersão a partir da análise tempo/frequência. Adaptado de Bensen et al. (2007).

Tal como já foi referido anteriormente no capítulo 3, é necessário retirar o efeito dos sismos e branquear o ruído sísmico ambiente. Para isso decidiu-se realizar a normalização no domínio do tempo e a normalização no domínio da frequência. Como os dois métodos explicados no subcapítulo 3.2.1 são equivalentes, optou-se por aplicar a média deslizante para a normalização no domínio do tempo. Para a normalização no domínio da frequência aplicou-se o método do branqueamento espectral, que consiste na atenuação de picos de frequências de forma a que o ruído se torne liso ou mais alisado.

Exemplos de resultados da aplicação dos dois métodos (média deslizante e 1-bit) estão representados nas figuras 5.2, onde também se mostra os dados antes da aplicação das normalizações. Para uma melhor comparação foi escolhido um dia com ocorrência de evento sísmico. Observando esta figura e tendo em atenção as escalas dos eixos verticais dos gráficos, podemos concluir que ambos os métodos são eficazes na remoção dos efeitos dos sismos, irregularidades instrumentais e fontes de ruído não estacionário perto da estação, sendo o método 1-bit mais agressivo.

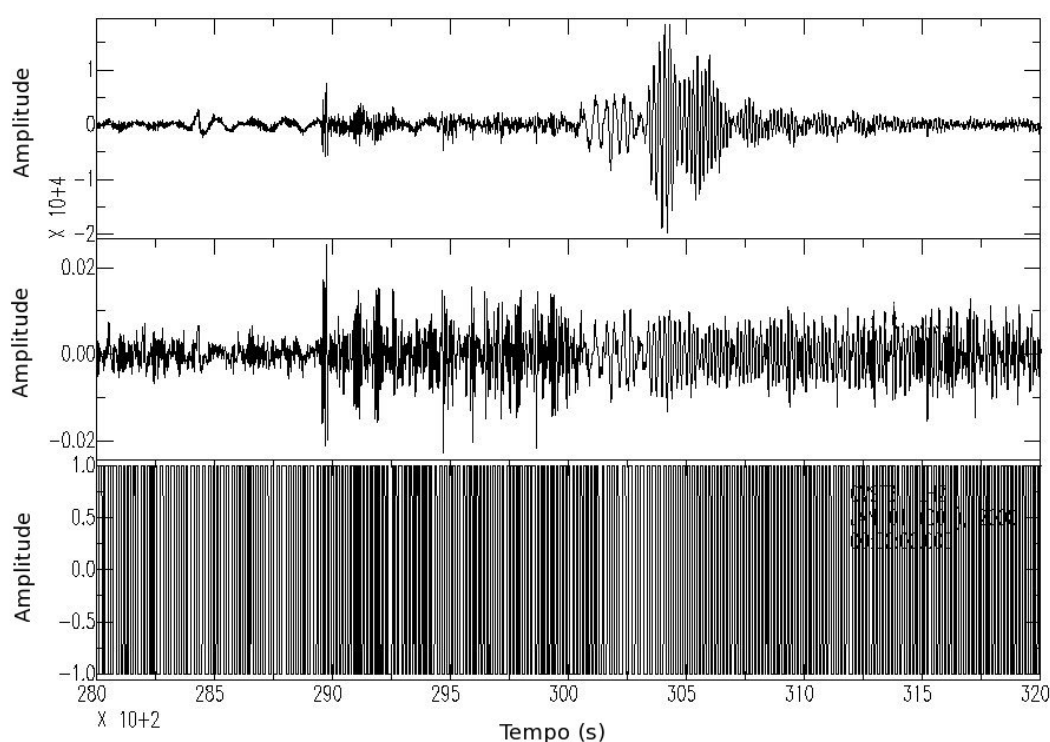


Figura 5.2 - Registos dos dados do dia 16 de Dezembro de 2007 da estação CVST3 (ilha de Santiago). O primeiro gráfico é o registo antes de se aplicar as normalizações, o segundo e terceiro são os registos após aplicação das normalizações. No primeiro caso seguiu-se o método média deslizante e o segundo no método 1-bit. Tendo em conta a diferença de escalas do eixo vertical dos gráficos, verifica-se que ambos os métodos são eficazes atenuando as amplitudes, sendo o segundo método mais agressivo.

Após a aplicação das normalizações realizou-se a correlação cruzada e o *stack* (explicados no subcapítulo 3.2.3). O *stack* melhora a identificação das Funções de Green, aumentando o valor da razão sinal/ruído, ou seja, a diferença de amplitude entre o sinal resultante da correlação e o ruído não coerente. A figura 5.3 mostra o resultado da correlação cruzada entre as estações CVMA1 (uma estação da ilha de Maio) e CVSA1 (uma estação da ilha de Santo Antão), para o caso de se realizar o *stack* para um mês, o mês de Dezembro e para o caso de se realizar para a totalidade dos meses em que as estações estiveram em funcionamento, desde Novembro de 2007 até Setembro de 2008. Através da comparação dos gráficos desta figura, verificamos um melhoramento da razão sinal/ruído do resultado para o *stack* de um mês para o resultado do *stack* de praticamente um ano. Analisando a razão sinal/ruído em função do período (figura 5.4) verifica-se, neste caso, que os melhores valores da

razão estão aproximadamente nos períodos correspondentes aos picos espectrais do ruído sísmico ambiente (aproximadamente 7.5s e 15s).

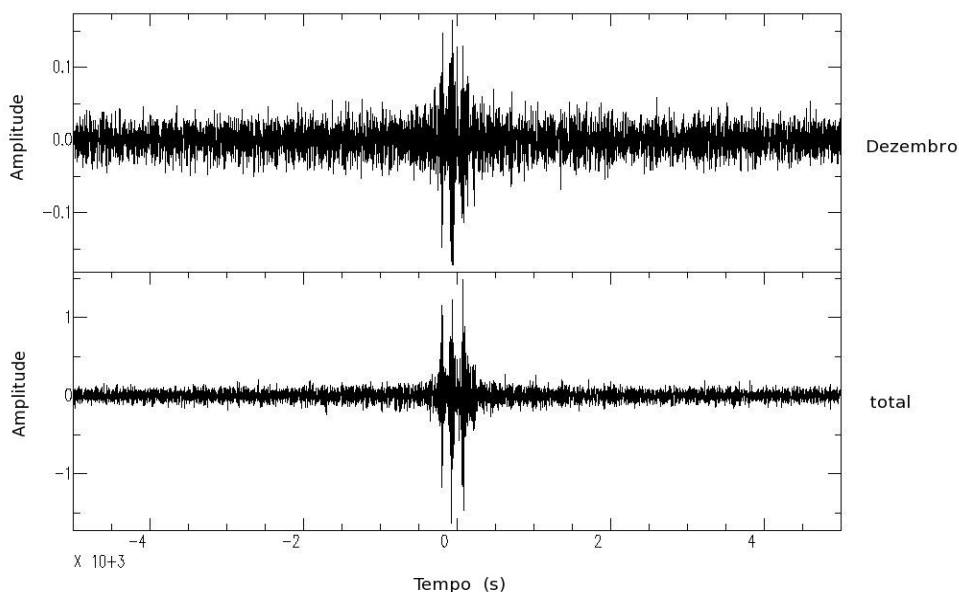


Figura 5.3 - Nesta figura está representado o resultado da correlação cruzada entre as estações CVMA1 e CVSA1. Em cima é o resultado para o caso de se realizar o *stack* para um mês (Dezembro), em baixo é o resultado da mesma correlação mas para o caso de se realizar o *stack* para a totalidade da duração dos dados (praticamente um ano). Comparando os dois gráficos desta figura, verifica-se o melhoramento da razão sinal/ruído com o *stack*.

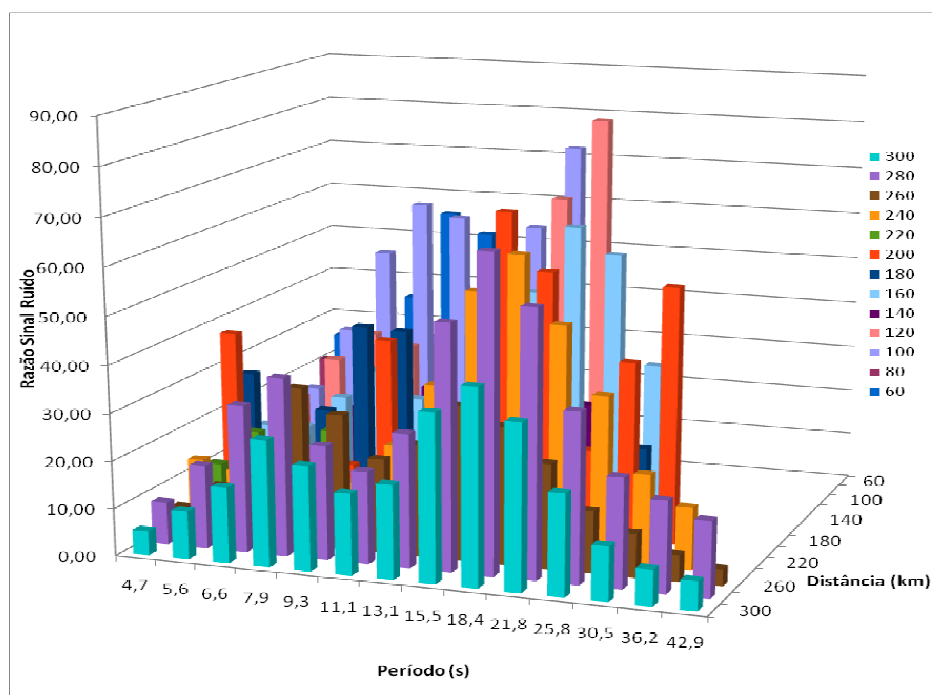


Figura 5.4 - Comportamento da razão sinal/ruído em função do período.

Tendo obtido a função de Green do ruído é possível trabalhá-la como se fosse uma onda de Rayleigh. Deste modo, após a obtenção destes primeiros resultados podemos realizar a análise tempo/frequência. Nesta análise pode-se obter diagramas de energia e curvas de dispersão das velocidades de grupo. Para a obtenção destes diagramas de energia e das curvas

de dispersão foi utilizado o método filtragem múltipla (referido e explicado no subcapítulo 3.3).

Neste estudo, foi decidido analisar apenas os resultados resultantes de trajectos de estações entre ilhas, ou seja, realizou-se a análise à escala do arquipélago, obtendo-se 634 trajectos.

Numa tentativa de se saber se o clima influenciou de alguma forma os registos, observou-se os resultados das correlações cruzadas para épocas diferentes. A tabela 5.1 mostra médias mensais de 1961 a 1990 da temperatura, precipitação e velocidade do vento referentes ao arquipélago de Cabo Verde. Observando esta tabela, dividiu-se os meses do ano da seguinte maneira:

- Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro meses considerados de época de transição;
- Março, Abril, Maio e Junho meses considerados de época seca;
- Julho, Agosto, Setembro e Outubro meses considerados de época húmida.

É de salientar que os meses Julho, Março e Novembro poderiam ser inseridos à correspondente época anterior, definindo-se as épocas de forma diferente.

Tabela 5.1 - Condições meteorológicas de Cabo Verde (médias de 1961 a 1990). Adaptado do site freemeteo (<http://freemeteo.com/>)

Mês	Temperatura Média	Precipitação Mensal Média	Velocidade do Vento Média por Mês
	°C	mm	m/sec
Janeiro	21.4 °C	5.3 mm	6.7 m/sec
Fevereiro	21.1 °C	3.8 mm	6.7 m/sec
Março	21.6 °C	1.3 mm	6.8 m/sec
Abril	21.9 °C	0.0 mm	6.8 m/sec
Maio	22.5 °C	0.0 mm	7.1 m/sec
Junho	23.4 °C	0.0 mm	6.8 m/sec
Julho	24.6 °C	0.8 mm	5.3 m/sec
Agosto	26.0 °C	14.1 mm	5.1 m/sec
Setembro	26.6 °C	33.6 mm	5.4 m/sec
Outubro	26.1 °C	6.5 mm	5.7 m/sec
Novembro	24.5 °C	2.5 mm	5.8 m/sec
Dezembro	22.7 °C	1.6 mm	6.4 m/sec

Após a definição das épocas do ano, procurou-se saber as condições climáticas e estado do mar relevantes no período de aquisição de dados (Novembro de 2007 a Setembro de 2008), apresentados na tabela 5.2 (vento) e nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 (altura significativa das ondas, período médio das ondas e pressão ao nível do mar). A tabela 5.2 é construída a partir de valores do vento obtidos numa estação localizada na ilha do Sal. Os parâmetros correspondentes às figuras 5.5, 5.6 e 5.7 são valores médios para a região do arquipélago de Cabo Verde, aproximadamente entre as latitudes 22°-26° W e as longitudes 14°-18° N. Nos gráficos 5.5, 5.6 e 5.7 estão desenhadas linhas a tracejado que dividem os meses nas épocas definidas anteriormente.

Tabela 5.2 - Velocidades máximas de vento prolongado entre Novembro de 2007 e Setembro de 2008. Criada a partir de valores diários encontrados no site freemeteo (<http://freemeteo.com/>)

Época	Mês	Vento médio mensal km/h	Vento médio sazonal km/h
Transição	Nov	22,8	23,1
	Dec	22,4	
	Jan	24,5	
	Fev	22,8	
Seca	Mar	21,0	22,9
	Apr	23,3	
	May	23,8	
	Jun	23,3	
Húmida	Jul	21,0	21,0
	Aug	21,0	
	Sep	21,0	

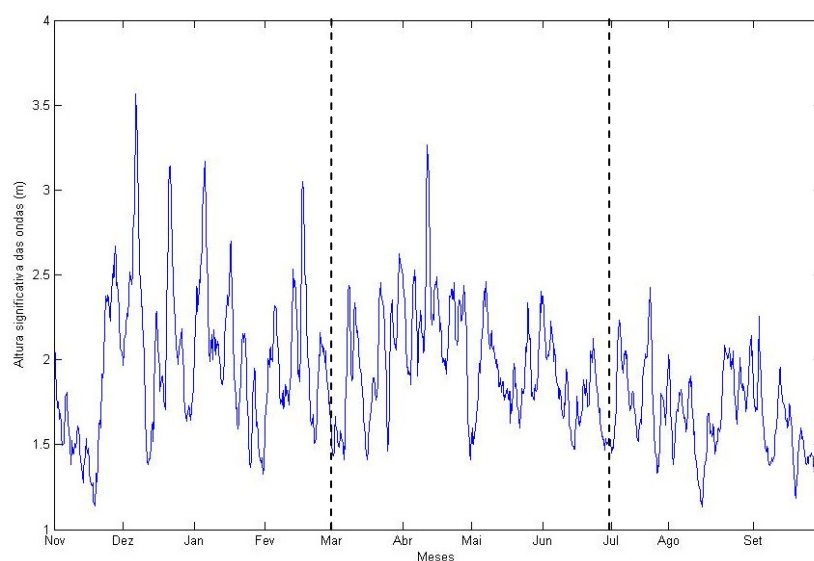


Figura 5.5 - Gráfico da altura significativa das ondas em função dos meses do ano, para a região de Cabo Verde durante o tempo de aquisição de dados.

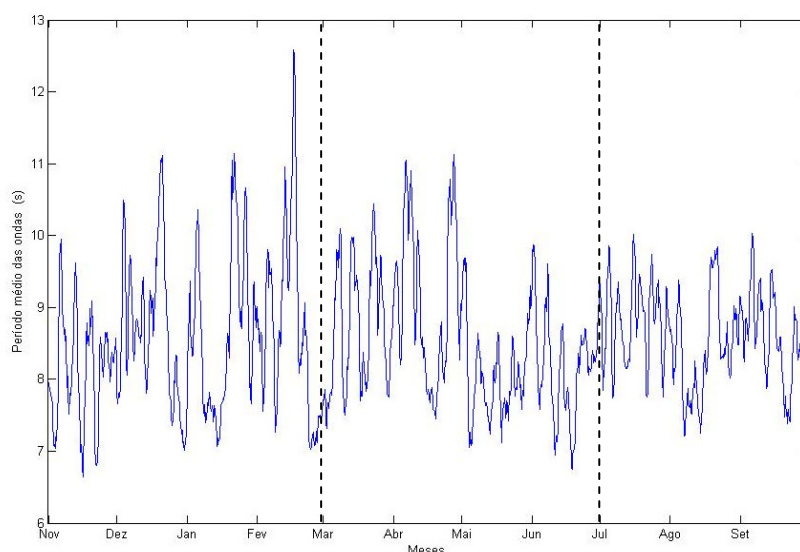


Figura 5.6 - Gráfico do período médio das ondas em função dos meses do ano, para a região de Cabo Verde durante o tempo de aquisição de dados.

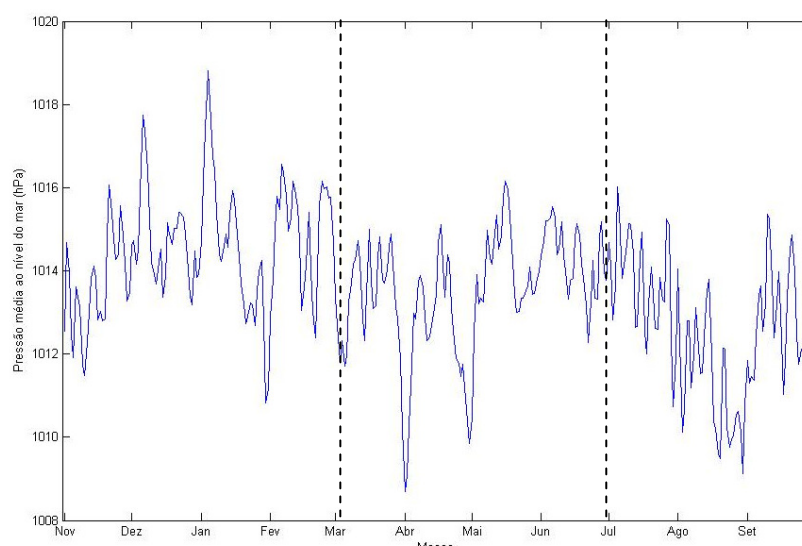


Figura 5.7 - Gráfico da pressão média ao nível do mar em função dos meses do ano, para a região de Cabo Verde durante o tempo de aquisição de dados.

Considerou-se os trajectos entre as ilhas Maio e Sal e as ilhas Santo Antão e Sal como sendo os trajectos mais relevantes para a avaliação das diferenças entre as épocas. Esta decisão foi tomada com base na direcção Nordeste dos ventos (Alíseos) da região de Cabo Verde. A figura 5.8 mostra a direcção aproximada do vento e a localização dos trajectos considerados (Maio-Sal e Santo Antão-Sal). As figuras 5.9 e 5.10 mostram os resultados da correlação cruzada para as três épocas definidas anteriormente.

Em ambos os trajectos e para todas as épocas, verifica-se que na parte anti-causal as amplitudes do sinal são maiores que na parte causal. Estas diferenças de amplitudes indicam uma fonte de ruído a Nordeste do arquipélago. Entre as diferentes épocas também se encontram diferenças nas amplitudes. Tanto para a figura 5.9 como para a figura 5.10, o resultado da correlação da época de transição (Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro) apresenta maiores amplitudes que nas outras duas épocas. Na época húmida (Julho, Agosto e Setembro) observa-se um sinal na parte causal próximo dos zeros segundos, que não se observa nas outras épocas.

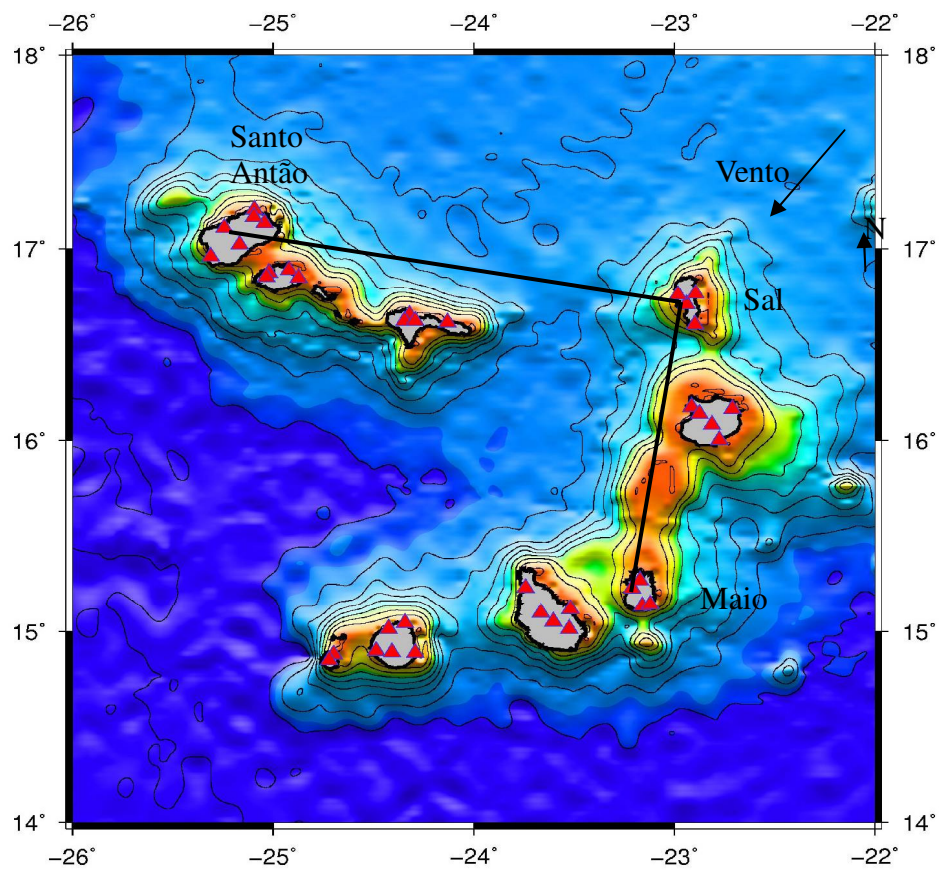


Figura 5.8 - Mapa do arquipélago de Cabo Verde indicando os dois trajectos estudados nas figuras 5.9 e 5.10. O trajecto de cima corresponde ao das ilhas Santo Antão e Sal e o trajecto de baixo corresponde ao das ilhas Maio e Sal.

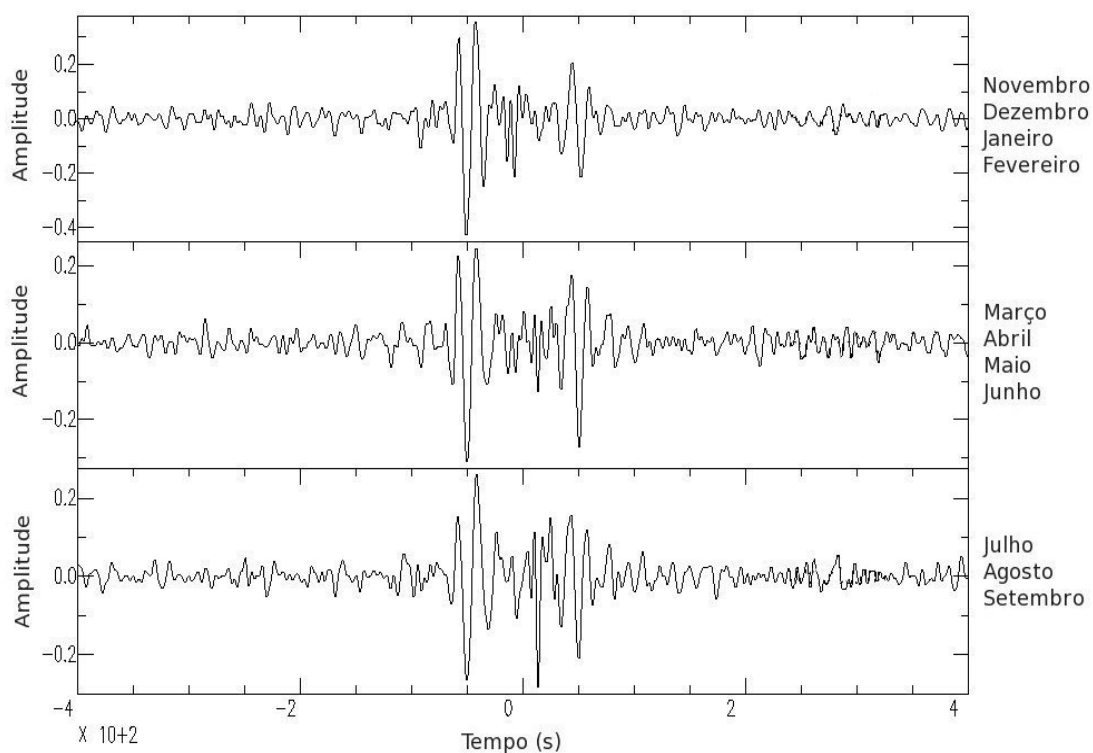


Figura 5.9 - Resultados da correlação cruzada do trajecto entre as ilhas Maio e Sal para as épocas definidas anteriormente. Nesta figura observa-se que a parte causal tem menor amplitude que a parte anti-causal.

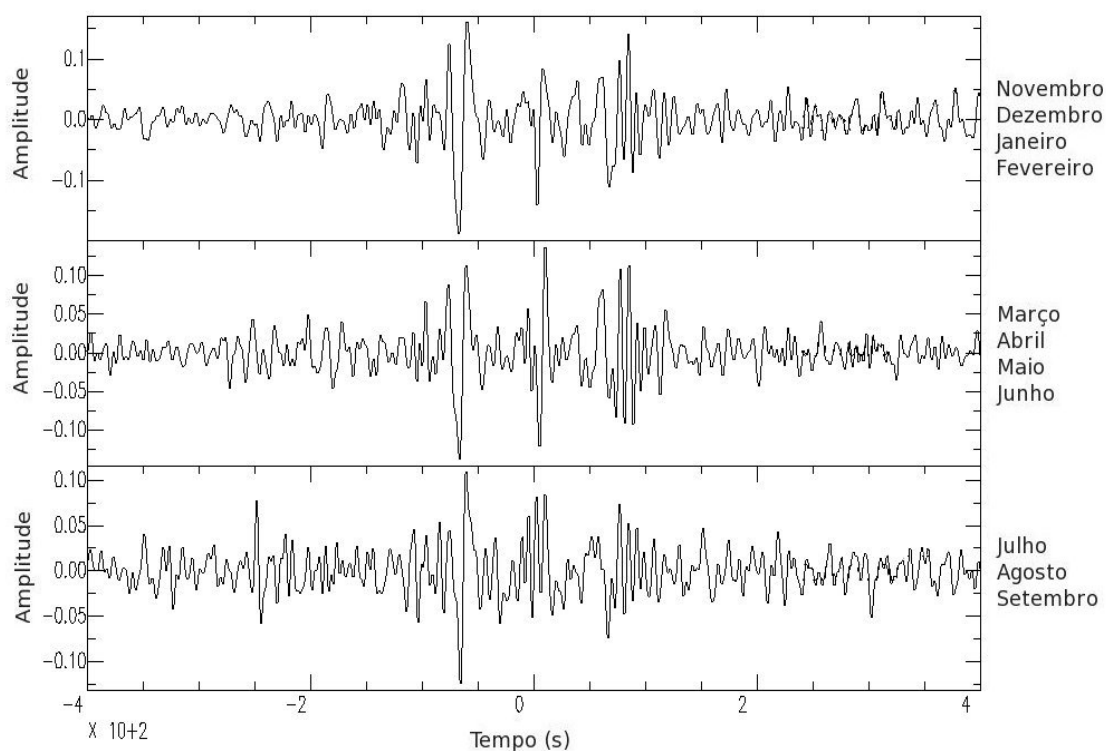


Figura 5.10 - Resultados da correlação cruzada do trajecto entre as ilhas Santo Antão e Sal para as épocas definidas anteriormente. Nesta figura observa-se que a parte causal tem menor amplitude que a parte anti-causal.

6 Resultados

6.1 Funções de Green obtidos a partir de um campo de ondas aleatório

No capítulo anterior observou-se os resultados da correlação cruzada para as diferentes épocas definidas nesse mesmo capítulo. No presente capítulo, pretende-se analisar de forma mais pormenorizada os resultados para toda a escala temporal dos dados, ou seja, de Novembro de 2007 a Setembro de 2008. Observando os trajectos das combinações possíveis das estações, verifica-se que trajectos entre estações do mesmo par de ilhas são semelhantes, por este motivo decidiu-se fazer a análise de trajectos entre ilhas e não entre estações, de forma a facilitar a análise de resultados para todo o arquipélago, tal como se fez no capítulo anterior. Para isso, adicionou-se os resultados dos vários trajectos entre o mesmo par de ilhas e dividiu-se pelo número de trajectos adicionados, ou seja, realizou-se a média. Após este procedimento obteve-se um total de 36 trajectos. A figura 6.1 mostra os resultados da correlação cruzada para os 36 trajectos em função das suas distâncias e na tabela B.1 (em anexo) estão indicados os pares de ilhas ordenadas por distâncias de trajecto.

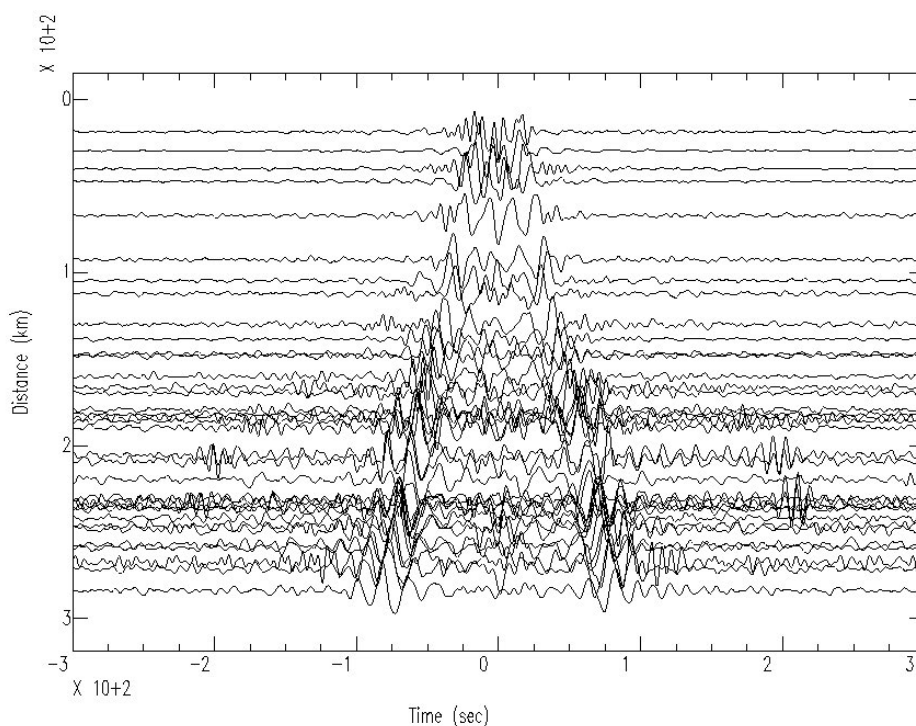


Figura 6.1 - Resultados da correlação cruzada dos 36 trajectos entre pares de ilhas, ordenados por distâncias. O trajecto de menor distância é Brava-Fogo e o trajecto de maior distância é Maio-Santo Antão. As distâncias entre cada par de ilhas estão indicadas e ordenadas na tabela B.1 (em anexo). Nesta figura é possível identificar um segundo sinal que será referido mais adiante.

Os resultados da correlação cruzada apresentam uma parte causal e uma parte anti-causal, como se pode verificar na figura 6.2 (e também nas figuras 6.1, 6.3, 6.4, 6.6 e 6.7). A existência destas duas partes e a semelhança das suas amplitudes indica-nos que o ruído é isotrópico relativamente à rede de estações, ou seja, as fontes de ruído estão distribuídas de tal forma que não privilegia nenhuma direcção.

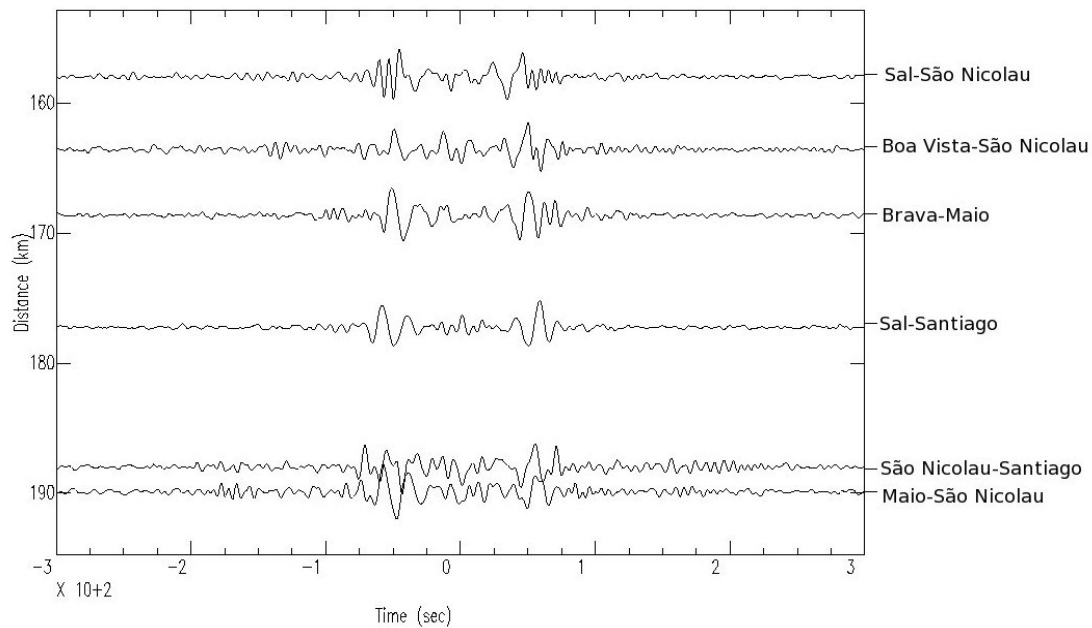


Figura 6.2 - Resultados da correlação cruzada para alguns trajectos entre ilhas em que os comprimentos dos trajectos são relativamente semelhante. Nesta imagem é possível ver a parte causal (parte positiva do gráfico) e a parte anti-causal (parte negativa do gráfico). Também se pode verificar a semelhança de amplitude entre as duas partes.

Na figura 6.3 e 6.4 para além de se poder verificar a existência de ambas as partes, a causal e a anti-causal, também se observa uma simetria no tempo zero segundos. Traçando duas rectas como as que se traçou na figura 6.3, verifica-se que a parte causal e a anti-causal são simétricas nos zero segundos.

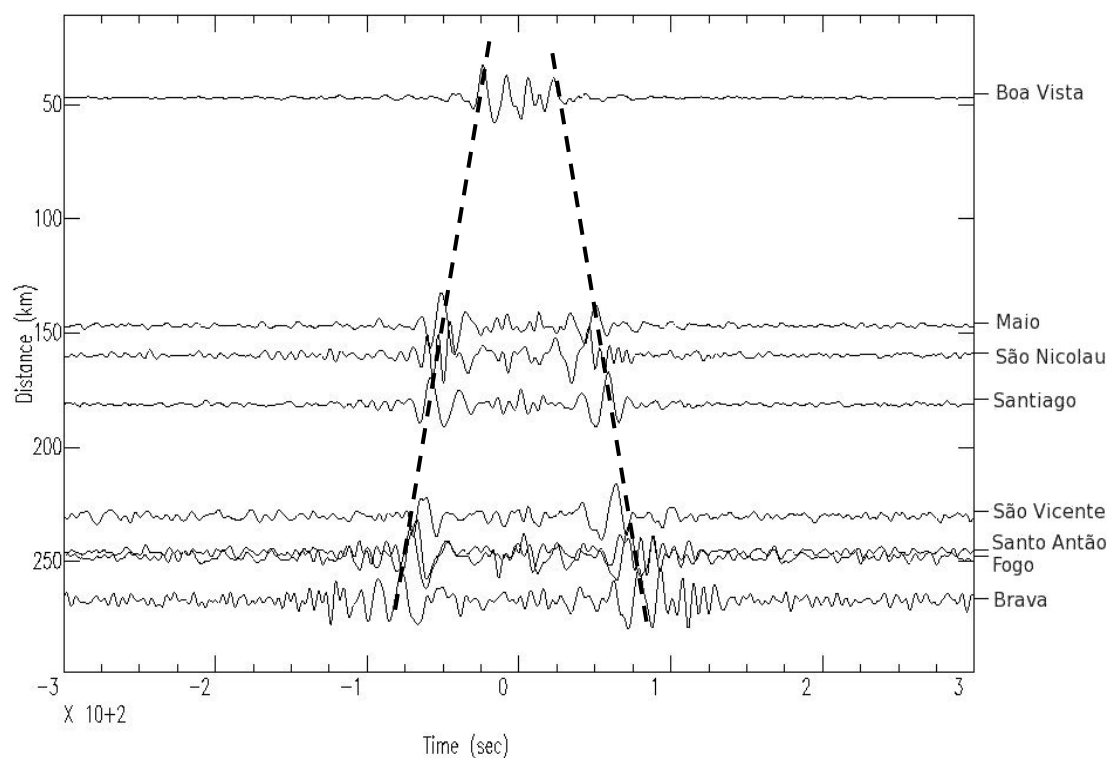


Figura 6.3 - Resultados da correlação cruzada da ilha Sal com cada uma das outras ilhas do arquipélago de Cabo Verde. Os resultados estão apresentados em função da distância entre as ilhas correlacionadas.

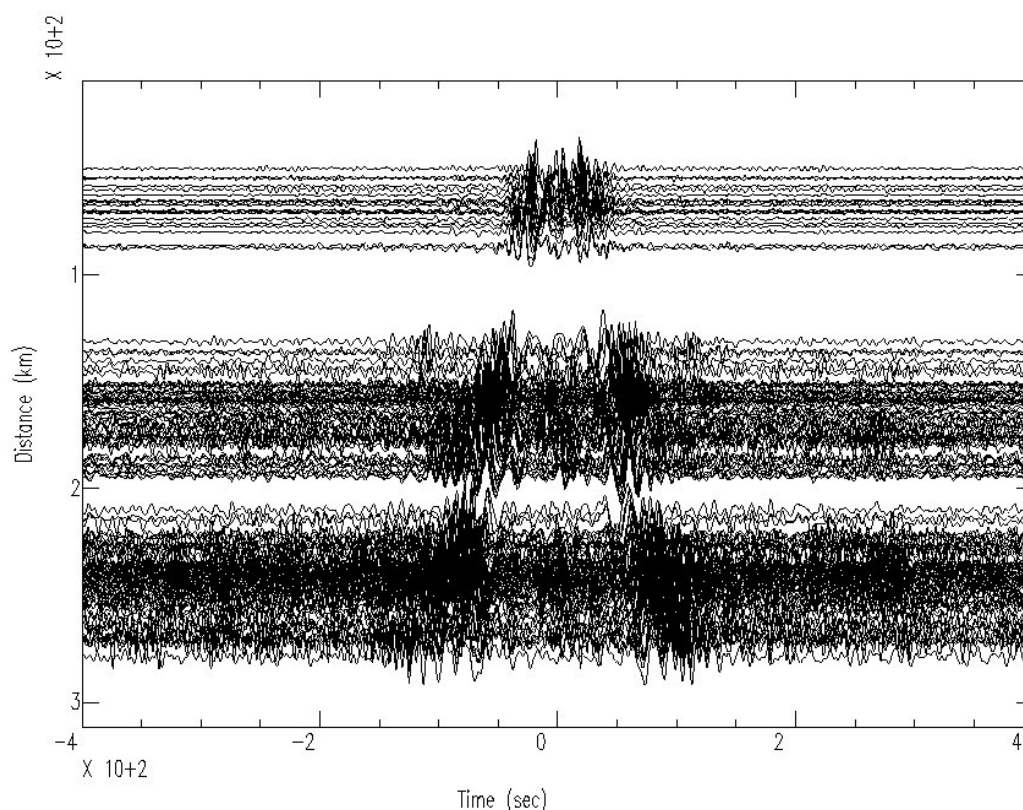


Figura 6.4 - Resultados da correlação cruzada das estações da ilha Sal com todas as outras estações das restantes ilhas do arquipélago de Cabo Verde. Os resultados estão apresentados em função da distância entre estações correlacionadas.

Analisando os resultados da correlação cruzada para os 36 trajectos entre pares de ilhas (figura 6.1), verifica-se que em alguns dos trajectos, nomeadamente Brava-Santo Antão, Brava-São Vicente, Brava-São Nicolau, Fogo-Santo Antão, Fogo-São Vicente e Fogo-São Nicolau, existe um segundo sinal visível em ambas as partes causal e anti-causal. Este sinal, tal como acontece no primeiro sinal, é simétrico nos zeros, apesar de neste caso a parte causal ter maior amplitude que a parte anti-causal. Na figura 6.6 e 6.7 estão representadas as correlações cruzadas que apresentam este segundo sinal para trajectos entre pares de ilhas (figura 6.6) e para trajectos entre pares de estações (figura 6.7).

Na figura 6.5, estão indicados os trajectos correspondentes às correlações cruzadas das figuras 6.6 e 6.7. Observando esta figura (a 6.5) verificamos que os trajectos onde se regista o segundo sinal, localizam-se na parte Oeste do arquipélago de Cabo Verde e têm uma orientação aproximadamente de Sul-Norte.

Analisando em conjunto as figuras 6.5, 6.6 e 6.7, concluímos que o sinal fica mais fraco (a sua amplitude diminui) de Oeste para Este. Por outro lado, observando a batimetria da região e a disposição das ilhas em forma de ferradura de Cavalo, pode-se considerar que o estranho sinal apresentado nos resultados de alguns trajectos (Brava e Fogo com Santo Antão, São Vicente e São Nicolau) é devido a interferências na zona mais profunda existente entre estas ilhas localizadas mais a Oeste do arquipélago. Como o primeiro sinal é mais forte na parte anti-causal, o segundo mais forte na parte causal e mais fraco que o primeiro, conclui-se que o segundo sinal é um eco do primeiro, que tal como se conclui no capítulo anterior, é devido a uma fonte localizada a Nordeste (NE).

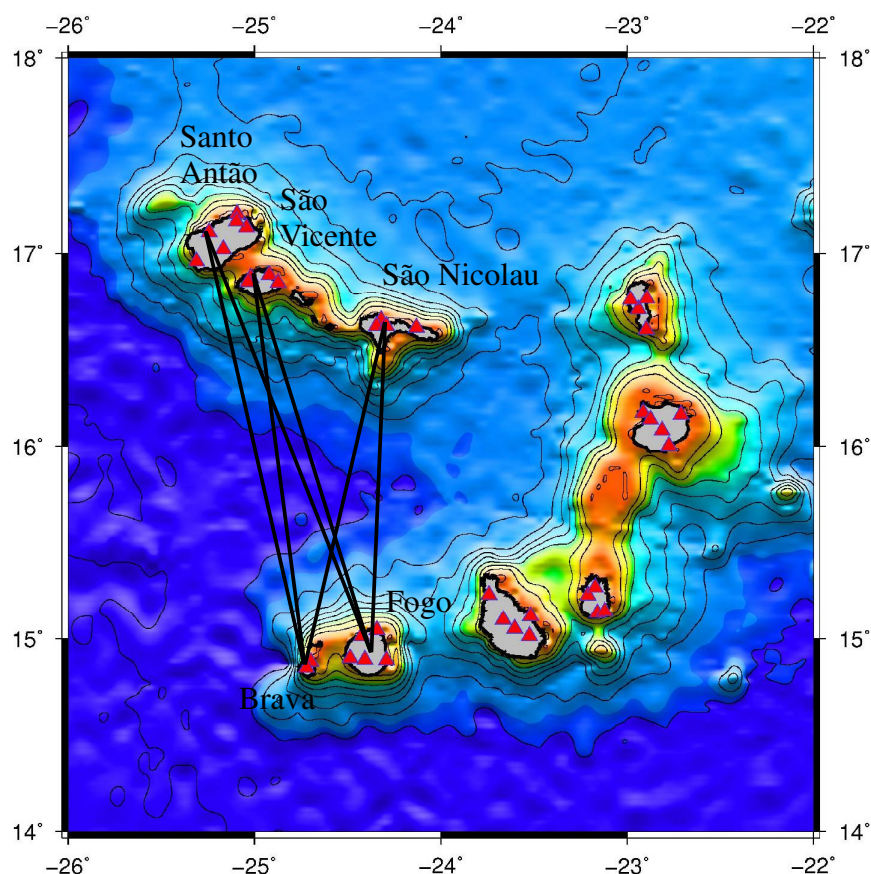


Figura 6.5 - Trajectos dos resultados da correlação cruzada apresentados nas figuras 6.6 e 6.7, onde é possível encontrar um segundo sinal cuja chegada depende da distância e que não se identificou ainda a causa deste, podendo apenas sugerir algumas possibilidades, como a profundidade e forma do arquipélago.

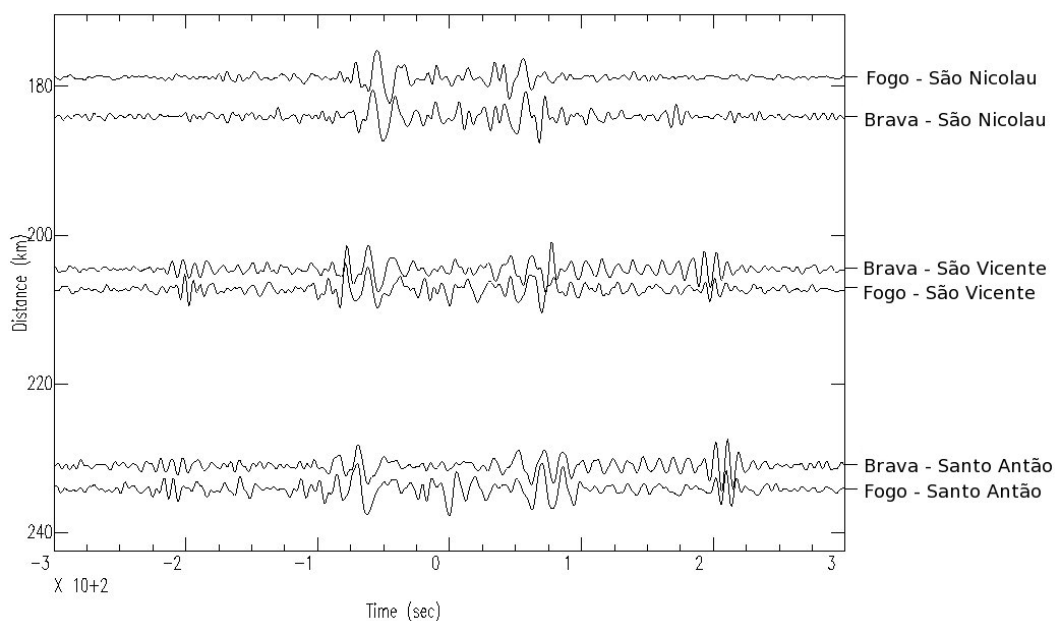


Figura 6.6 - Resultados da correlação cruzada para os trajectos entre ilhas que têm um segundo sinal. Este sinal é mais forte na parte causal (parte positiva do gráfico).

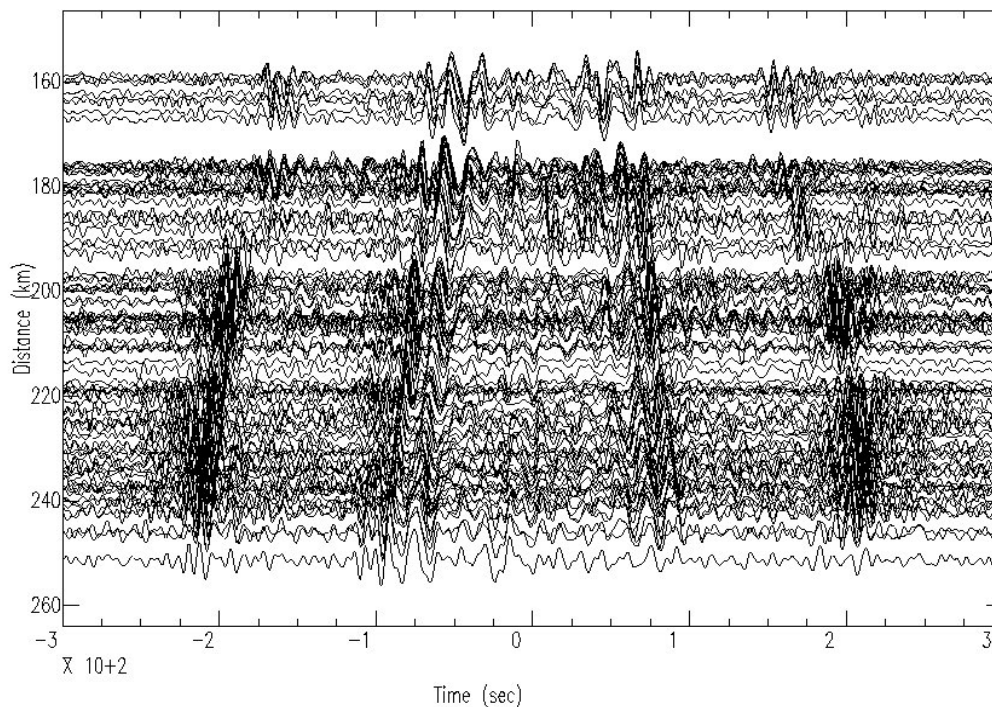


Figura 6.7 - Resultados da correlação cruzada para os trajectos entre estações para os mesmos pares de ilhas que a figura 6.6. Nesta figura verifica-se a existência de um segundo sinal cujas rectas que une os pontos de chegada deste são simétricas nos zero segundos, tal como acontece com as rectas de chegada do primeiro sinal. Tanto na parte causal como na anti-causal, as rectas do segundo sinal parecem ser paralelas ao do primeiro sinal.

Numa perspectiva de verificar o carácter dispersivo das ondas Rayleigh (ondas superficiais), aplicou-se o filtro Butterworth (disponibilizado pelo SAC) para diferentes bandas de períodos (5-10s, 8-15s e 12-24s). Nas figuras 6.8 e 6.9 estão representadas as funções de Green filtradas para diferentes bandas de períodos, obtidas a partir das correlações cruzadas entre as estações CVBR1-CVSA1 e entre CVSL2-CVSV2. Observando estas figuras é possível verificar para ambos os casos que o sinal não chega ao mesmo tempo para todos os períodos. Quanto maior for o período, menor é o tempo de chegada do sinal, ou seja, o sinal chega em primeiro lugar para os longos períodos. Estas diferenças na chegada do sinal mostram que este é dispersivo.

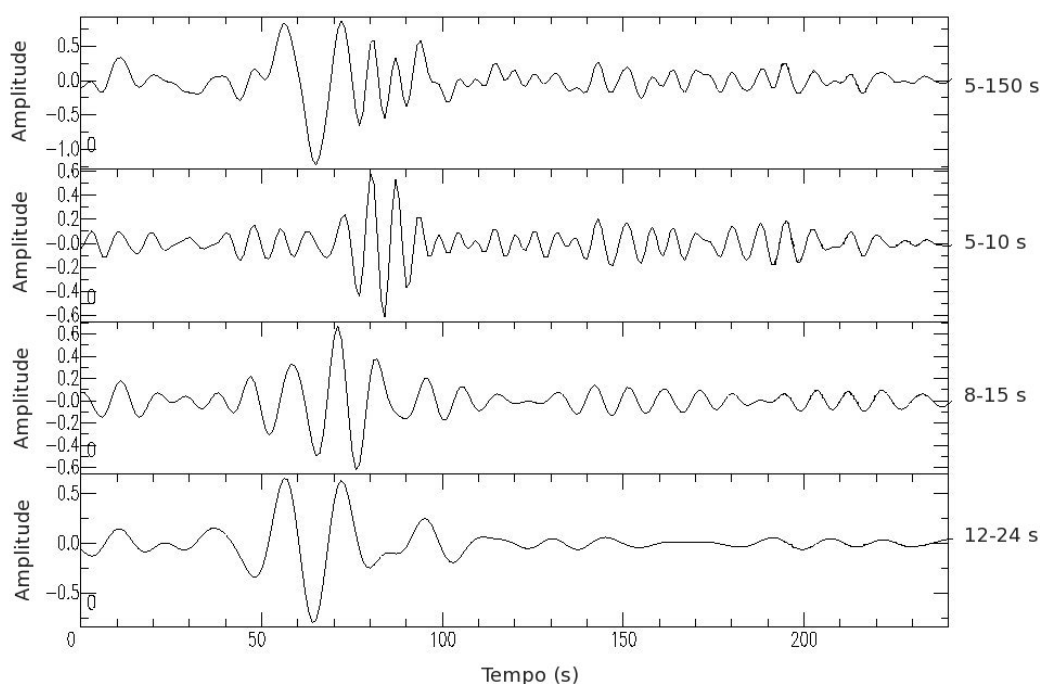


Figura 6.8 - Função de Green resultante da correlação cruzada entre as estações CVSL2 e CVSV2. O sinal para toda a banda de períodos (5-150s) está representado em cima, em baixo deste está representado o mesmo sinal filtrado para várias bandas de período diferentes (indicada ao lado de cada caso). A função de Green apresentada corresponde a um caso em que é apenas registado um sinal.

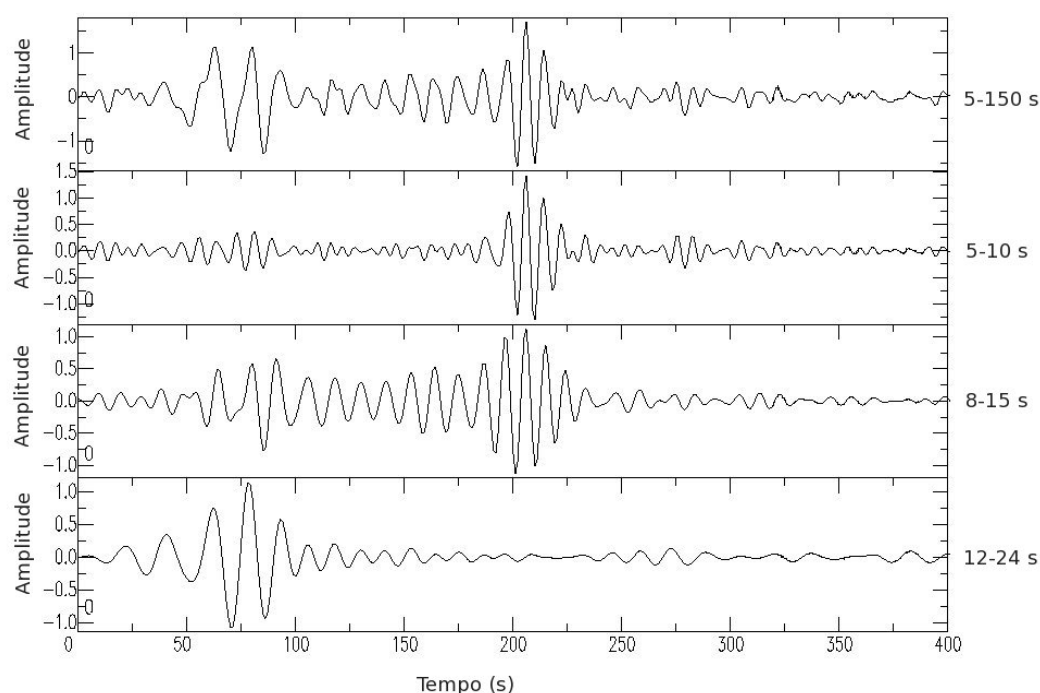


Figura 6.9 - Função de Green resultante da correlação cruzada entre as estações CVBR1 e CVSA1. O sinal para toda a banda de períodos (5-150s) está representado em cima, em baixo deste está representado o mesmo sinal filtrado para várias bandas de período diferentes (indicada ao lado de cada caso). A função de Green apresentada corresponde a um caso em que é registado um segundo sinal provavelmente por causa da batimetria.

6.2 Diagramas de energia

Após a obtenção das funções de Green, obteve-se, a partir da análise tempo/frequência destas, os diagramas de energia apresentados nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13. Estas figuras são constituídas por três gráficos: o primeiro (diagrama de energia) mostra os valores de amplitude para cada período centrado, utilizado pelo filtro e para a velocidade de grupo; no segundo gráfico observa-se a função de Green para a banda de períodos considerados e no terceiro observa-se as amplitudes espectrais.

No primeiro gráfico das figuras (diagrama de energia) é assinalada, com pontos a vermelho, a localização das amplitudes máximas, a partir do qual, se ajusta uma linha (a azul escuro), que representa uma estimativa da curva de dispersão. Os valores máximos das amplitudes marcados no primeiro gráfico, são também assinalados no terceiro de forma a poder-se verificar a qualidade do ajuste.

Com a análise destes diagramas pretende-se perceber e verificar se a energia das ondas se encontra entre os períodos 5 e 30 segundos e se se obtêm estimativas de curvas de dispersão semelhantes ao que se espera (da teoria e da observação a figura 3.10) para um ambiente de ilhas oceânicas.

Na figura 6.10 é representada a localização no arquipélago, dos trajectos em estudo neste subcapítulo. Ao observarmos esta figura verificamos que estes trajectos, estando localizados em diferentes zonas do arquipélago, cobrem praticamente todas as diferentes partes deste (zonas maioritariamente de terra, mar pouco profundo e mar mais profundo).

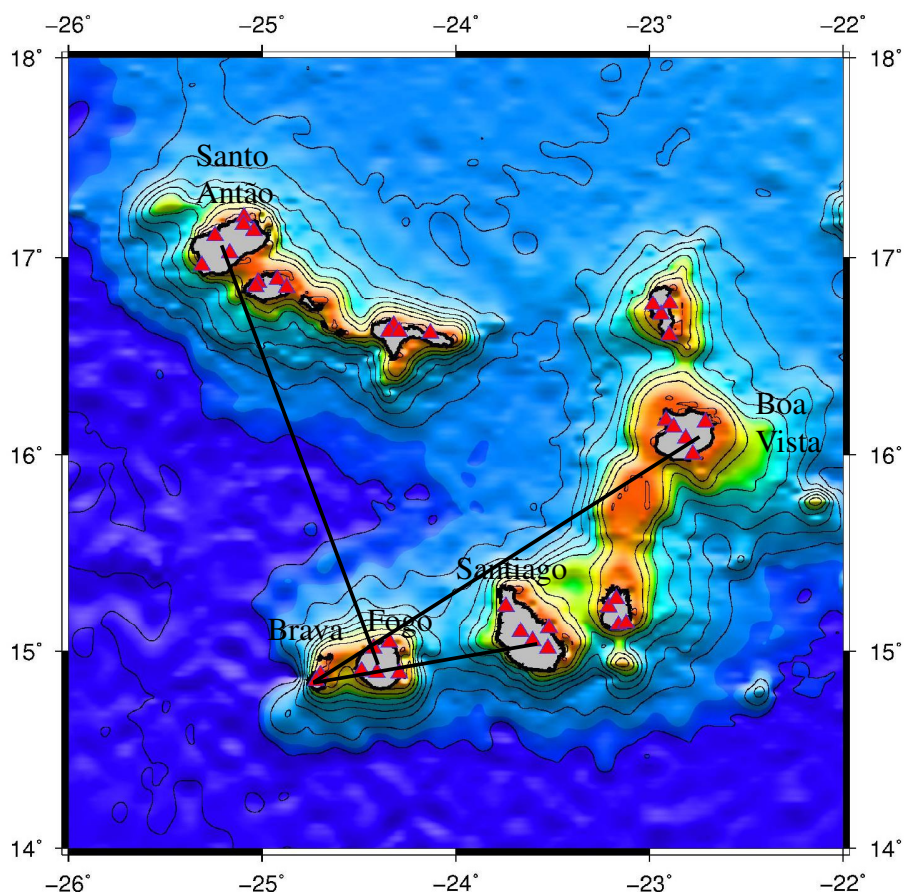


Figura 6.10 - Trajectos dos resultados dos diagramas de energia analisados em baixo. Observando a figura verificamos que os trajectos escolhidos atravessam diferentes zonas do arquipélago de Cabo Verde. Um trajecto que atravessa uma zona maioritariamente sobre o mar mais profundo (Fogo-Santo Antão), outro que atravessa uma zona maioritariamente sobre mar pouco profundo (Brava-Boa Vista) e outro que atravessa uma zona maioritariamente sobre terra (Brava-Santiago).

Nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13 verificamos que a maior parte da energia está contida na banda dos períodos entre aproximadamente de 15s a 30s. Em todas estas figuras não se verifica a presença de modos superiores, verificando-se apenas o modo fundamental. Este está definido com clareza em todas as figuras com a excepção da última, figura 6.13.

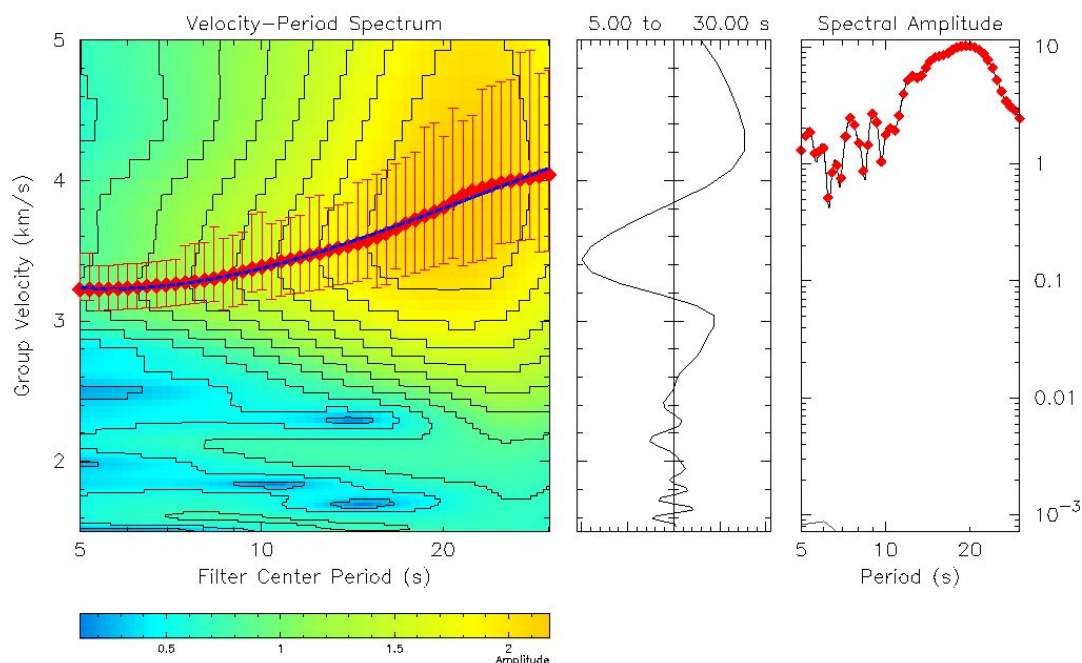


Figura 6.11 - Diagrama de energia para o trajecto Brava-Santiago. Para além do diagrama de energia vemos a meio a forma de Green e à direita o espectro de amplitudes. Os pontos marcados a vermelho no diagrama de energia, são os pontos de maior amplitude para cada período, pontos estes que estão assinalados (pontos a vermelho) no gráfico do espectro de amplitudes. Este trajecto é maioritariamente sobre ilhas, como mostra a figura 6.10.

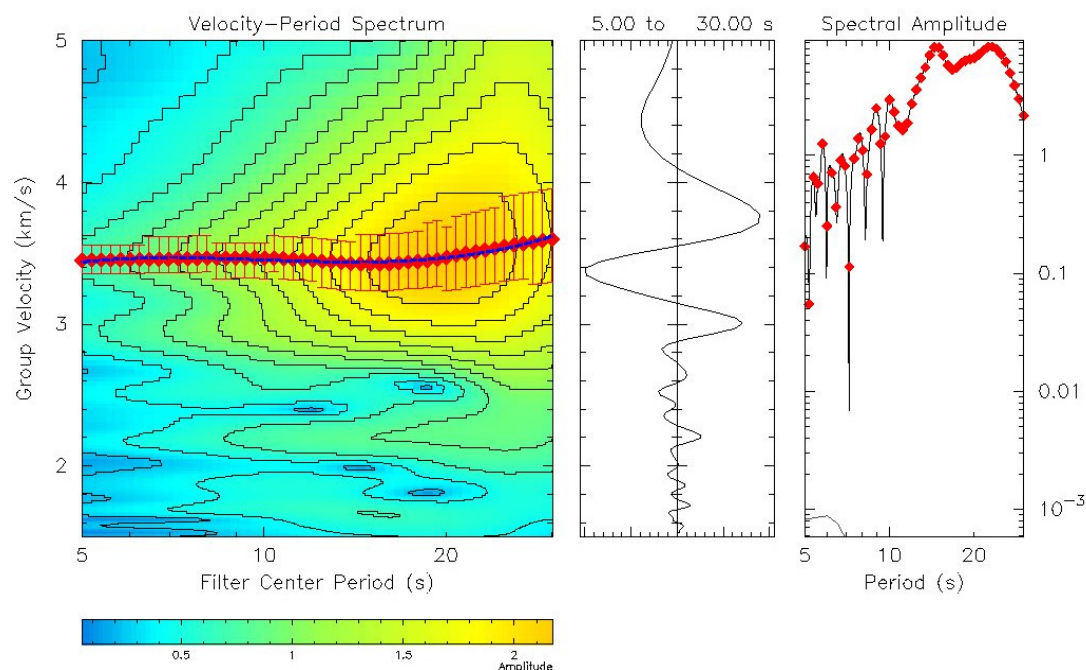


Figura 6.12 - Diagrama de energia para o trajecto Brava-Boa Vista. Este trajecto é maioritariamente sobre uma zona de mar pouco profundo, como mostra a figura 6.10. Para mais detalhes, ver legenda da figura 6.11.

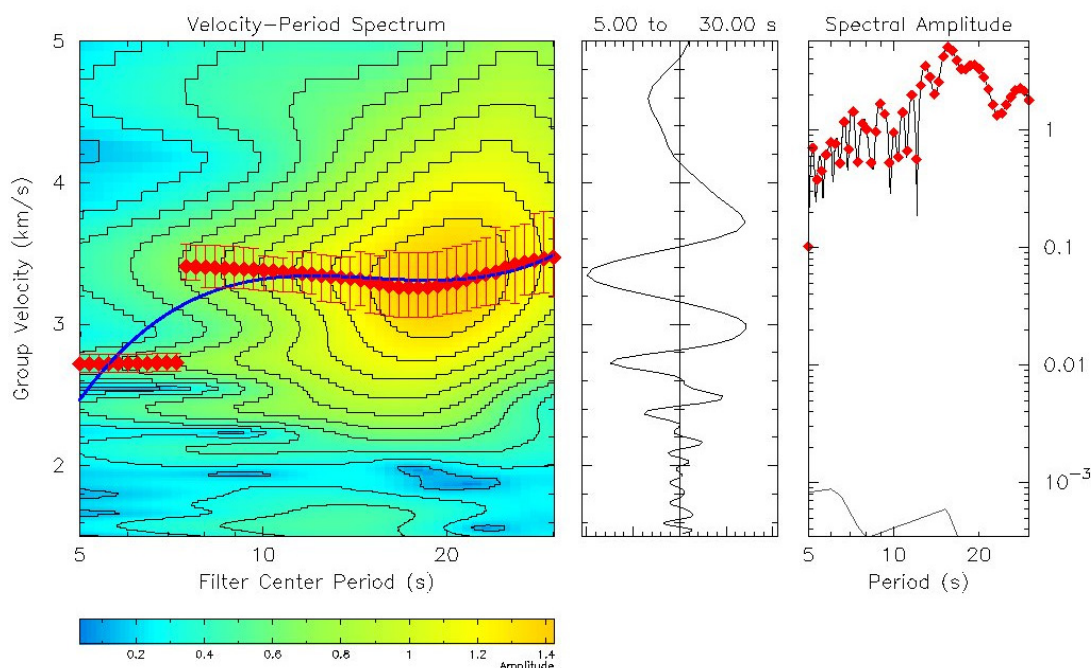


Figura 6.13 - Diagrama de energia para o trajecto Fogo-Santo Antão. Este trajecto é maioritariamente sobre uma zona de mar entre ilhas mais profundo, como mostra a figura 6.10. Para mais detalhes, ver legenda da figura 6.11.

6.3 Curvas de dispersão

Através da análise tempo/frequência das funções de Green pode-se obter não só os diagramas de energia (apresentados no subcapítulo anterior) como também as curvas de dispersão das velocidades de grupo das ondas Rayleigh. Na análise destas curvas de dispersão na região do arquipélago de Cabo Verde, optou-se por apresentá-las em dois grupos: as curvas de dispersão dos trajectos entre duas estações que passam maioritariamente sobre ilhas e as curvas de dispersão dos trajectos entre duas estações que passam sobre o mar. Em cada um destes dois grupos encontram-se curvas de dispersão de zonas mais jovens e de zonas mais antigas do arquipélago.

As figuras 6.16, 6.17, 6.18, 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23, dos pontos 6.3.1 e 6.3.2, mostram as curvas de dispersão para períodos entre os 5 e 30 segundos. No topo de cada figura é indicado o par de ilhas a que corresponde e a distância aproximada entre elas. As linhas a cheio de cada uma das figuras representam as curvas de dispersão dos trajectos entre duas estações de diferentes ilhas. As linhas a tracejado indicam o valor aproximado acima do qual as curvas deixam de ter significado. Estes valores são estimado a partir da equação 21, tendo em conta que as ondas que se propagam entre as duas estações do trajecto a analisar tenham no mínimo dois comprimentos de onda (λ), ou seja,

$$\lambda = \frac{d}{2} \quad (20)$$

onde d é a distância entre as duas estações;

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (21)$$

T é o período máximo com significado e c é a velocidade de grupo das ondas Rayleigh, que se obteve através da observação das curvas de dispersão.

Através da observação da figura 6.14, verificamos que não existem muitas discrepâncias entre todas as curvas de dispersão obtidas neste estudo, tendo em conta que para estações mais próximas, apenas os períodos mais pequenos têm significado, como é o caso das curvas de dispersão entre as ilhas Brava e Fogo.

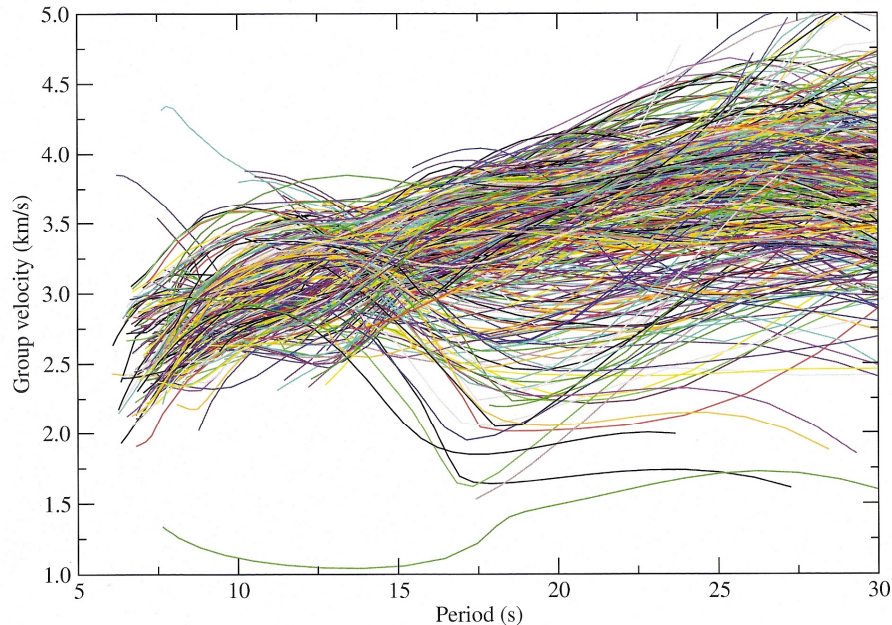


Figura 6.14 - Gráfico das curvas de dispersão das velocidades de grupo das ondas Rayleigh obtidas neste trabalho. Neste gráfico é possível verificar a coerência dos resultados obtidos através da sobreposição da maioria das curvas de dispersão. É de relembrar que algumas curvas só têm significado para os períodos mais pequenos devido à proximidade das estações.

6.3.1 Curvas de dispersão de trajectos sobre ilhas

Das quatro figuras que se seguem, as figuras 6.16 e 6.17 são referentes às zonas de idade mais recente do arquipélago de Cabo Verde (zonas mais a Oeste), enquanto que a última (figura 6.18) é referente a uma zona de idade mais antiga deste arquipélago (zona mais a Este). Na figura 6.15 estão desenhados os trajectos correspondentes a cada uma das figuras 6.16, 6.17 e 6.18.

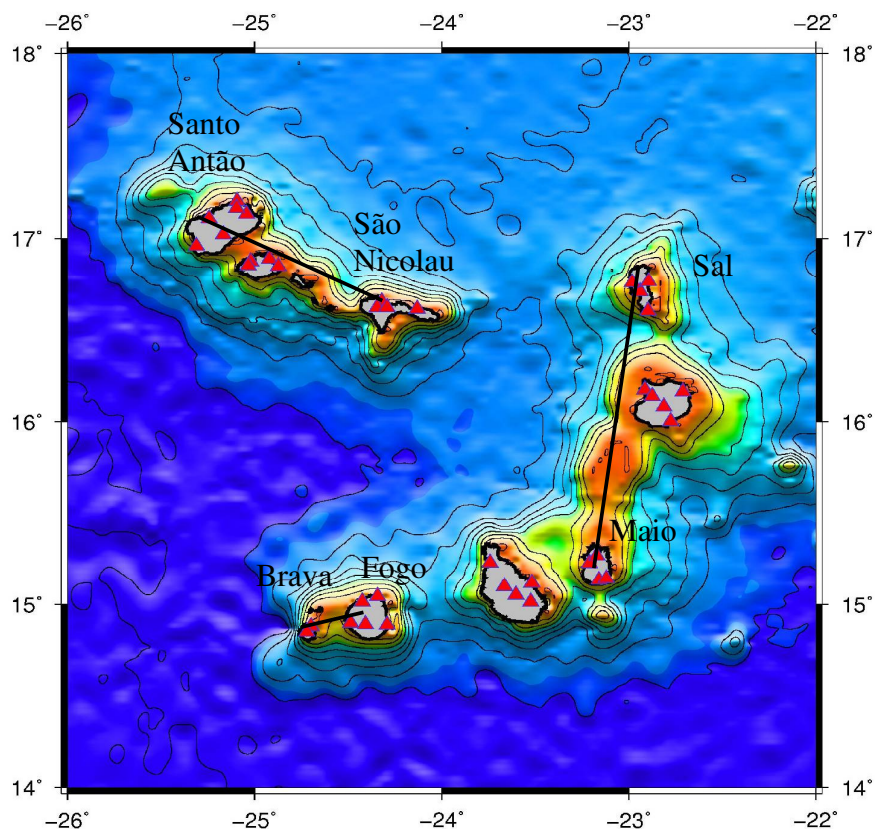


Figura 6.15 - Mapa com os trajectos entre ilhas e maioritariamente sobre as ilhas. Os trajectos assinalados são os estudados nas figuras 6.16, 6.17 e 6.18. Neste mapa a zona mais à esquerda (a Oeste) representa a zona de idade mais recente e a zona mais à direita (a Este) representa a zona de idade mais antiga.

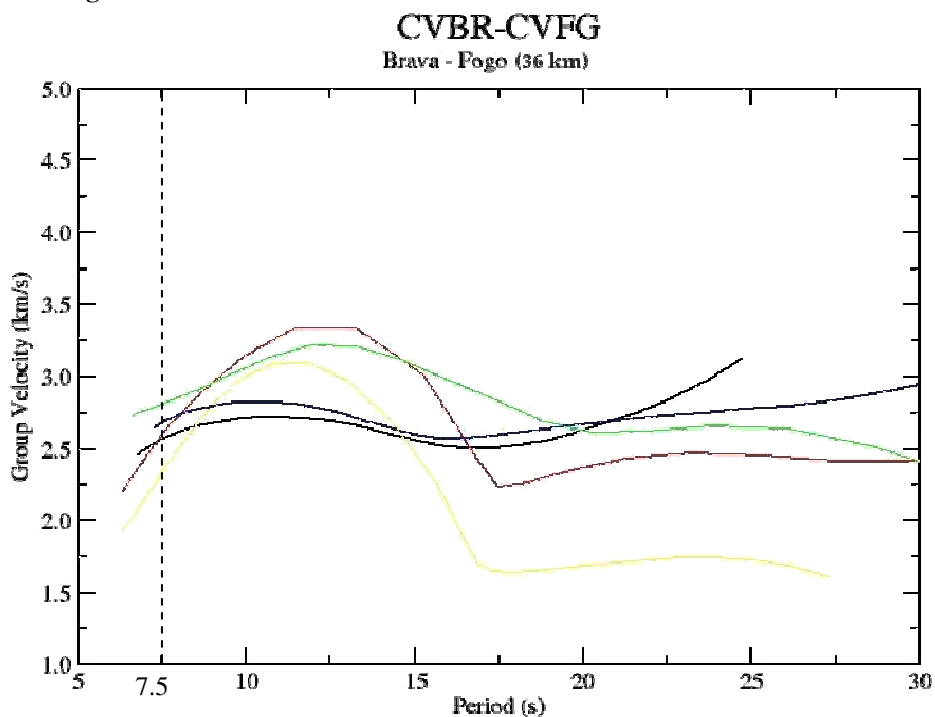


Figura 6.16 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Brava e Fogo. Aproximadamente a partir dos 7.5s para maiores períodos, as curvas de dispersão não têm significado devido à pequena distância entre as ilhas.

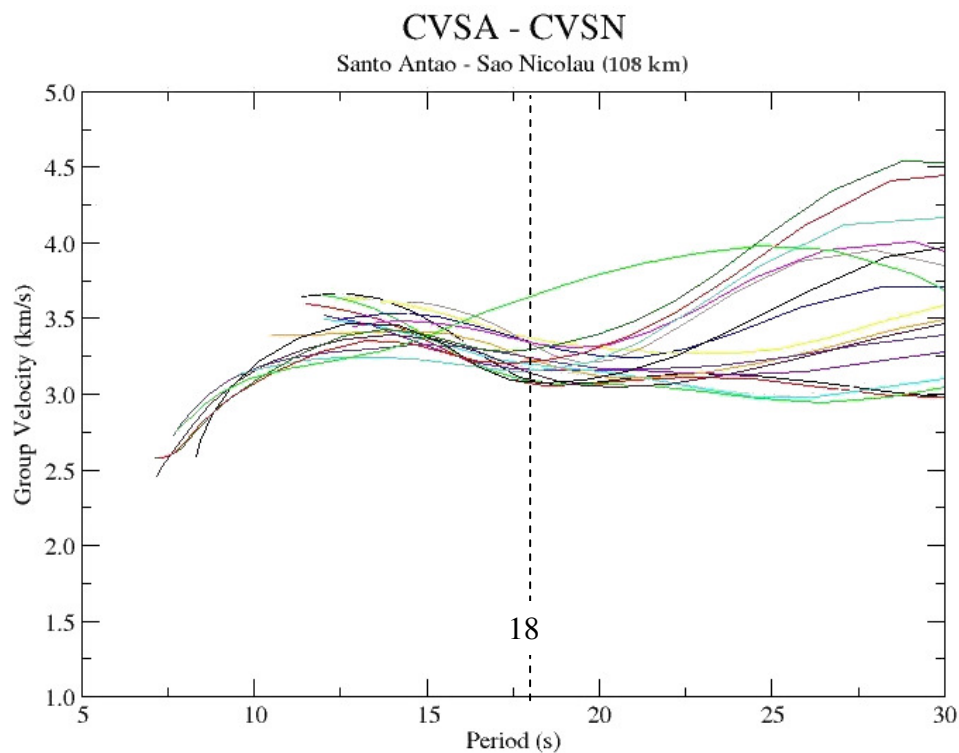


Figura 6.17 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Santo Antão e São Nicolau. Aproximadamente a partir dos 18s para maiores períodos as curvas de dispersão não têm significado devido à distância entre as ilhas.

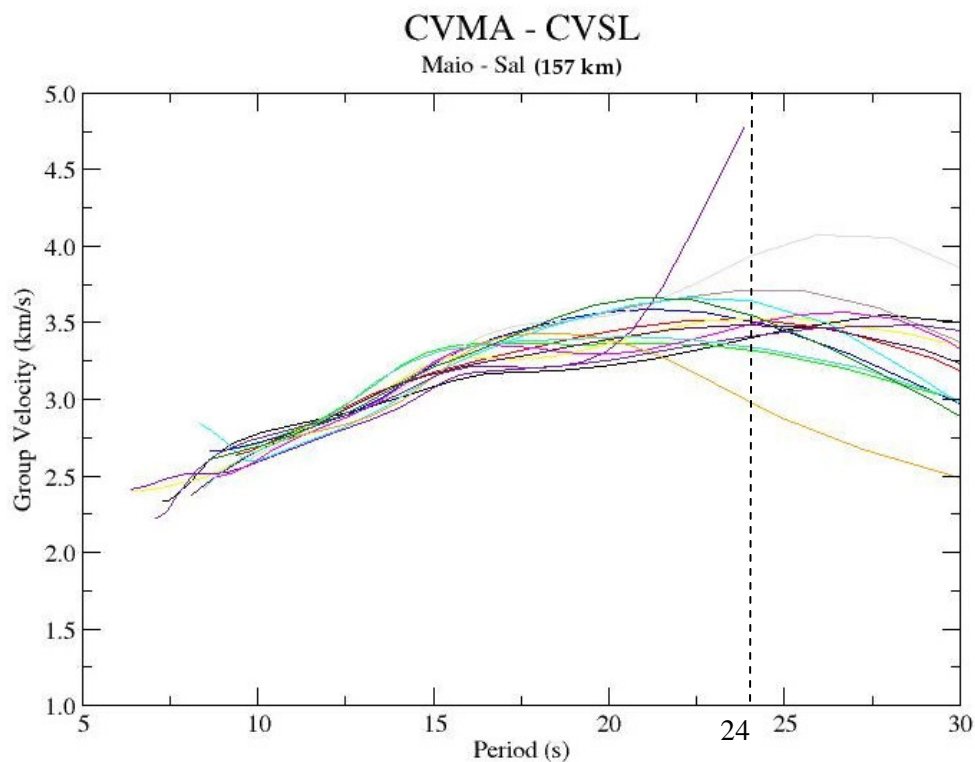


Figura 6.18 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Maio e Sal. Aproximadamente a partir dos 24s para maiores períodos as curvas de dispersão não têm significado devido à distância entre as ilhas.

Observando as três figuras anteriores (figuras 6.16, 6.17 e 6.18), verificamos que as velocidades de grupo aumentam com os períodos, exceptuando a figura 6.17 que aproximadamente a partir dos 12,5s as velocidades de grupo, para todas as curvas de dispersão desta figura com excepção de uma, decrescem com o aumento dos períodos. As curvas de dispersão das zonas mais jovens (figuras 6.16 e 6.17) apresentam um crescimento com o aumento dos períodos mais brusco comparativamente com as curvas de zonas mais antigas do arquipélago.

6.3.2 Curvas de dispersão de trajectos sobre o mar

Nesta parte, também se encontram figuras relacionadas com diferentes idades do arquipélago. Das cinco figuras que se seguem a segunda e a última (figuras 6.20 e 6.23) representam curvas de dispersão de zonas mais jovens do arquipélago de Cabo Verde (zonas mais a Oeste), enquanto que a terceira e a quarta figura (figuras 6.21 e 6.22) representam as curvas de zonas mais antigas deste arquipélago (zona mais a Este). Na figura 6.19 estão desenhados os trajectos correspondentes a cada uma das figuras 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23.

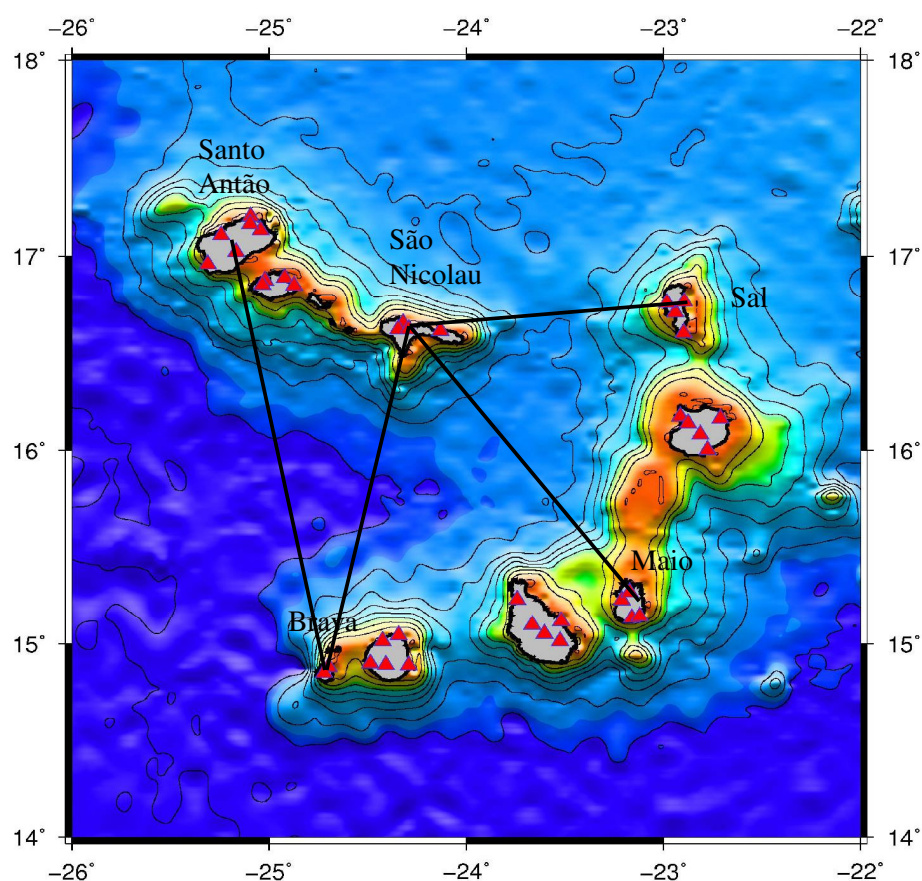


Figura 6.19 - Mapa com os trajectos entre ilhas e maioritariamente sobre mar. Os trajectos assinalados são os estudados nas figuras 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23. Neste mapa a zona mais à esquerda (a Oeste) representa a zona de idade mais recente e a zona mais à direita (a Este) representa a zona de idade mais antiga.

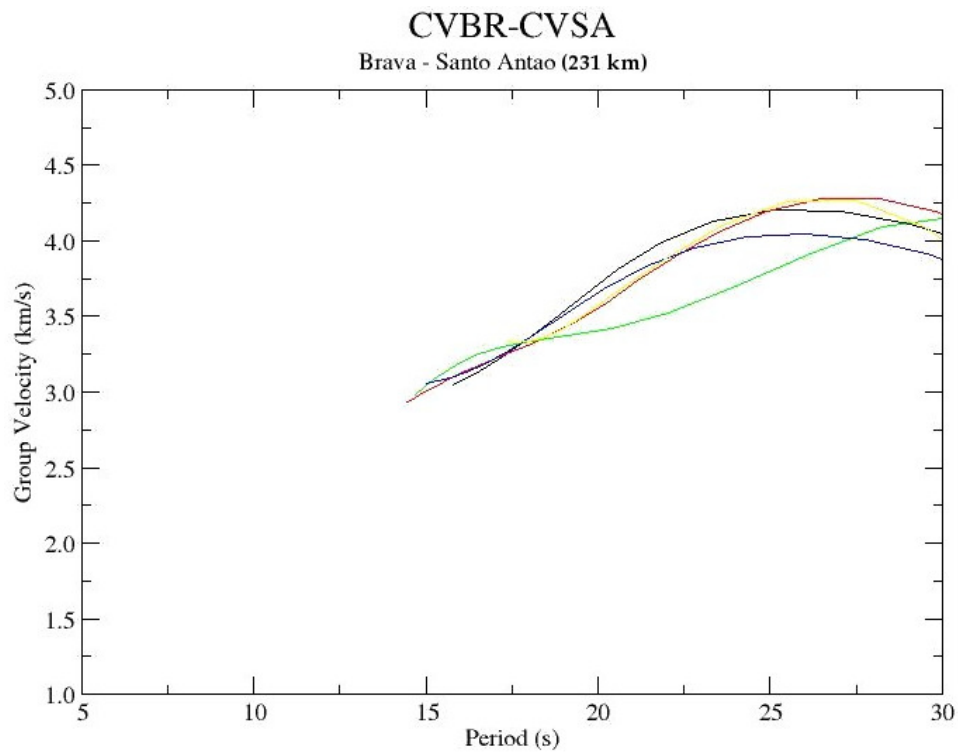


Figura 6.20 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Brava e Santo Antão.

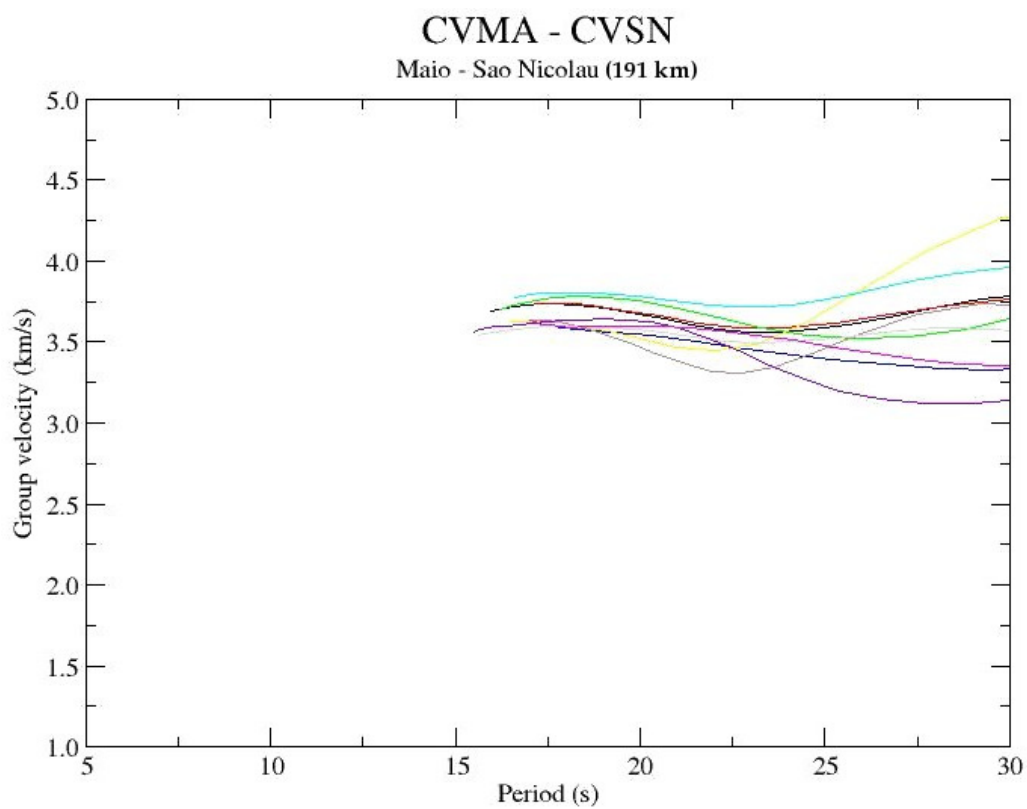


Figura 6.21 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Maio e São Nicolau.

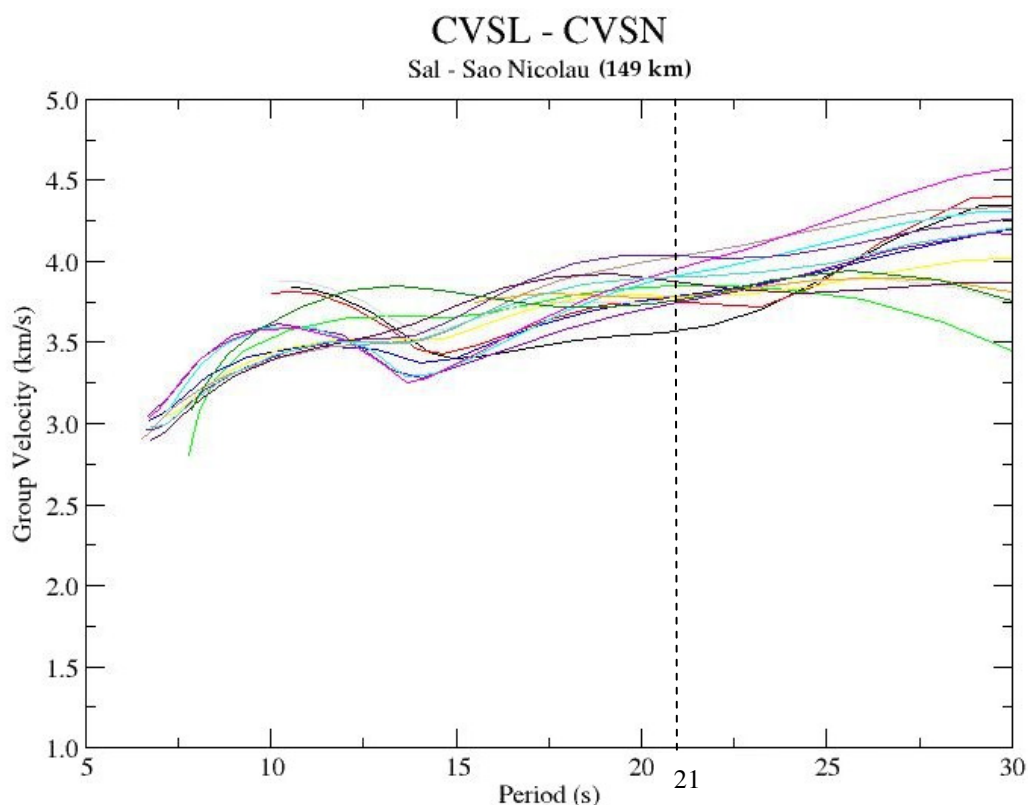


Figura 6.22 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Sal e São Nicolau. Aproximadamente a partir dos 21s para maiores períodos as curvas de dispersão não têm significado devido à pequena distância entre as ilhas.

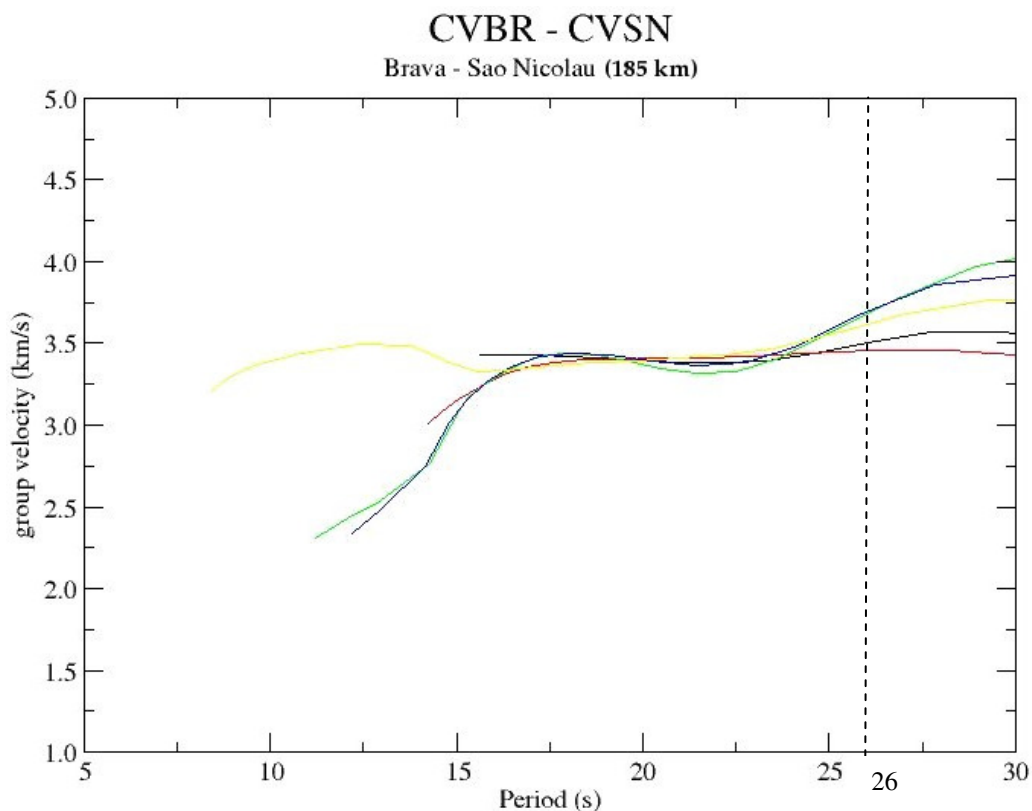


Figura 6.23 - Curvas de dispersão da velocidade de grupo do trajecto entre Brava e São Nicolau. Aproximadamente a partir dos 26s para maiores períodos as curvas de dispersão não têm significado devido à pequena distância entre as ilhas.

Observando as quatro figuras anteriores (figuras 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23) verificamos que as velocidades de grupo aumentam com os períodos, exceptuando na figura 6.23 que aproximadamente entre os 15s e 24s se mantêm constantes. Tal como no caso dos trajectos sobre ilhas, também neste caso se verifica que as curvas de dispersão de zonas mais jovens do arquipélago têm um crescimento mais brusco com os períodos que no caso das curvas de zonas mais antigas. Isto deve estar relacionado com o aumento da espessura da crosta com a idade.

Ao compararmos as curvas de dispersão dos trajectos sobre ilhas (figuras 6.16, 6.17 e 6.18) com as curvas dos que atravessam zonas de mar (figuras 6.20, 6.21, 6.22), observamos que estas curvas de dispersão possuem valores de velocidade de grupo mais altos que as curvas de dispersão de trajectos que passam sobre ilhas. Este facto deve-se a uma menor espessura da crosta sob os trajectos maioritariamente de mar em comparação com a crosta sob os trajectos maioritariamente de terra, pois numa crosta menos espessa (como normalmente é a crosta oceânica) as velocidades de grupo das ondas Rayleigh sentem mais rapidamente o efeito do manto, onde as velocidades são normalmente mais elevadas.

7 Conclusões

Neste estudo utilizou-se o ruído sísmico ambiente, registado em 39 estações no arquipélago de Cabo Verde ao longo de aproximadamente 11 meses (Novembro de 2007 a Setembro de 2008), com o objectivo de investigar a estrutura da crosta sob esta região. Com estes registos foi possível obter funções de Green que permitiram obter as curvas de dispersão da velocidade de grupo das ondas de Rayleigh.

As velocidades de grupo calculadas para cada duas ilhas, a partir das correlações entre os diferentes pares de estações, apresentam o mesmo tipo de comportamento. A análise das diferentes curvas de dispersão parece revelar a presença de uma crosta mais espessa sob as ilhas mais antigas, tal como já tinha sido observado noutros trabalhos. As correlações calculadas para as estações localizadas nas ilhas mais a ocidente, com trajectos Norte-Sul, revelam a presença de um segundo pacote quer na parte causal, quer na parte anti-causal. Este segundo pacote poderá ser um “eco” produzido pela estrutura das ilhas (disposição em forma de ferradura) e pela batimetria da zona ocidental da bacia de Cabo Verde.

As análises efectuadas aos registos, sugerem a existência de influência da agitação marítima no ruído sísmico ambiente registado pelas estações. Contudo, torna-se necessário aprofundar a natureza desta influência, através da realização de correlações entre os registos sísmicos e os registos dos parâmetros da agitação marítima. Desta forma, propõe-se como trabalho futuro, estudar de um modo mais aprofundado a relação entre o sinal do ruído sísmico ambiente e a variação da agitação marítima (definida pela altura significativa das ondas e pelo período médio das ondas). Pretende-se também, realizar tomografia 2D que nos permitirá estudar a distribuição lateral das velocidades de grupo em função do período.

Referências

- Aki K., 1957. Space and Time of Stationary Stochastic Waves. *Earthquake Research Institute*, vol. XXXV, Part3.
- Ali M. Y., A. B. Watts, I. Hill, 2003a. A seismic reflection study of lithospheric in the vicinity of the Cape Verde Islands. *Journal of Geophysical Research* **108**, 2239.
- Ali, M. Y., A. B. Watts, I. Hill, 2003b. Struture of Mesozoic crust in the vicinity of the Cape Verde Islands from seismic reflection profiles.
- Bensen G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. Moschetti, N. M. Shapiro, Y. Yang, 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International* **169**, 1239-1260.
- Brink U. S. T., Brocher T. M., 1987. Multichannel Seismic Evidence for a Subcrustal Intrusive Complex Under Oahu and a Model for Hawaiian Volcanism. *Journal of Geophysical Research* **92**, 13687-13707.
- Calmant S., J. Francheteau, A. Cazenave, 1990. Elastic layer thickening with age of the oceanic lithosphere: a tool for prediction of the age of volcanoes or oceanic crust. *Geophysical Journal International* **100**, 59-67.
- Courtney R. C., R. S. White, 1986. Anomalous heat flow and geoid across the Cape Verde Rise: evidence for dynamic support from a thermal plume in the mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **87**, 815-867.
- Crough S.T., 1978. Thermal origin of mid-plate hotspot swells. *Geophysical Journal International* **55**, 451-469.
- Dash B. P. , I. M. M. Ball, I. G. A. King, L. W. Butler, F. P. A. Rona, 1976. Geophysical investigation of the Cape Verde Archipelago. *Journal of Geophysical Research* **81**, 5249-5259.
- Duncan R.A., 1984. Age progressive volcanism in the New England Seamounts and the opening of the Central Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research* **89**, 9980-9990.
- Dziewonski A., J. Mills, S. Bloch, 1972. Residual dispersion measurement – A new method of surface wave analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* **62**, 129-139.
- Dziewonski A., M. Landisman, 1970. Great Circle Rayleigh and Love Wave Dispersion from 100 to 900 Seconds. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **19**, 37-91.
- Gerlach, D. C., Cliff, R. A., Davies, G. R., Norry, M. J. & Hodgson, N., 1988. Magma sources of the Cape Verde archipelago: Isotopic and trace element constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **52**, 2979–2992.
- Gouédard P., 2008. Techniques de ccorrélacion: aspects méthodologiques et applications à la sub-surface. Tese de Doutoramento. Universidade Joseph Fourier – Grenoble I.

- Grand S. P., R. D. van der Hilst, R. D. S. Widiyantoro, 1997. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. *GSA Today* **7**, 1-7.
- Heleno da Silva S. I. N., S. J. Day, J. F. B. D. Fonseca, 1999. Fogo Volcano, Cape Verde Islands: seismicity-derived constraints on the mechanism of the 1995 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **94**, 219-231.
- Landès M., 2006. Structure de la croûte sous les Açores par analyse du bruit sismique. Tese de Mestrado. Instituto de Física do Globo de Paris.
- Larose E., A. Derode, M. Campillo, M. Fink, 2004. Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse fields. *Journal of Applied Physics* **95**, 8393-8399.
- Lay T., T. C. Wallace, 1995. Modern global seismology. Volume 58 of *International geophysics series*. San Diego: Academic Press. ISBN 0-12-732870-X.
- Lodge A., G. Helffrich, 2006. Depleted swell root beneath the Cape Verde Islands. *Geological Society of America* **34**, 449-452.
- Matos Alves C.A., Macedo J.R., Silva L.C., Serralheiro A., Peixoto A.F., 1979. Estudos geológico, petrológico e vulcanológico da Ilha de Santiago (Cabo Verde). *Garcia de Orta: Série Geologia* **3**, 9 –27.
- Mégnin C., B. Romanowicz, 2000. The 3D velocity structure of the mantle from the inversion of body, surface, and higher mode waveforms. *Geophysical Journal International* **143**, 709-728.
- Montelli R., G. Nolet, F. Dahlen, G. Masters, R. Engdahl, S. Hung, 2004. Finite-Frequency Tomography Reveals a Variety of Plumes in the Mantle. *Science* **303**, 338-343.
- Morgan W.J., 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature* **230**, 42-43.
- Morgan J.P., W. J. Morgan, E. Price, 1995. Hotspot melting generates both hotspot volcanism and a hotspot swell? *Journal of Geophysical Research* **100**, 8045-8062.
- McNutt M. K. J., 1988. Thermal and mechanical-properties of the Cape Verde Rise. *Journal of Geophysical Research* **93**, 2784–2794.
- Pim J., C. Peirce, A. B. Watts, I. Grevemeyer, A. Krabbenhoft, 2008. Crustal structure and origin of the Cape Verde Rise. *Earth and Planetary Science Letter* **272**, 422-428.
- Schimmel M., H. Paulssen, 1997. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks. *Geophysical Journal International* **130**, 497-505.
- Serralheiro A., 1976. A geologia da ilha de Santiago (Cabo Verde). Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Shapiro N. M., M. Campillo, 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters* **31**, L07614.
- Shapiro N. M., M. Campillo, L. Stehly, M. H. Ritzwoller, 2005. High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise. *Science* **307**, 1615-1618.

- Silveira G., E. Stutzmann, (2002). Anisotropic tomography of the Atlantic Ocean. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **132**, 237-248.
- Udías A., 1999. Principles of Seismology. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0-521-62478-9.
- Weaver R. L., O. I. Lobkis, 2001. Ultrasonics without a Source: Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies. *Physical Review Letters* **87**, 13, 134301(4).
- Weaver R. L., O. I. Lobkis, 2004. Diffuse fields in open system and the emergence of the Green's function (L). *Journal Acoustical Society of America* **116**, 5, 2731-2734.
- Williams C. A., Hill, I. A., Young, R., White, R. S., 1990. Fracture zones across the Cape Verde Rise, NE Atlantic. *Journal of the Geological Society, London* **147**, 851–857.
- Yao H., R. D. van der Hilst, M. V. de Hoop, 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis – I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International* **166**, 732-744.

Anexos

A – Rede CV-PLUME/COBO

Tabela A.1 - Ilhas Sotavento

Ilha	Localidade	Tipo de estação	Código	Latitude	Longitude	Alt.	Período de operação
Brava	Braga	Coberta	CVBR1	14.880430	-24.697940	473	30/11/2007 a 09/09/2008
Brava	Campo Baixo	Coberta	CVBR2	14.849250	-24.721540	622	04/04/2008 a 28/08/2008
Fogo	São Filipe	Coberta	CVFG1	14.898050	-24.488640	201	29/11/2007 a 08/09/2008
Fogo	São Jorge	Coberta	CVFG2	15.013450	-24.426160	243	29/11/2007 a 13/05/2008
Fogo	Mosteiros	Coberta	CVFG3	15.045010	-24.343400	25	29/11/2007 a 30/12/2007; 12/01/2008 a 06/08/2008
Fogo	Cova Figueira	Coberta	CVFG4	14.887600	-24.293090	323	28/11/2007 a 12/03/2008
Fogo	Monte Grande	Coberta	CVFG5	14.889750	-24.407200	929	29/11/2007 a 28/06/2008
Maio	Calheta	Coberta	CVMA1	15.228800	-23.211033	20	25/11/2007 a 09/09/2008
Maio	Barreiro	Coberta	CVMA2	15.134733	-23.161150	56	19/02/2008 a 13/04/2008; 15/05/2008 a 09/09/2008
Maio	Ribeira D. João	Coberta	CVMA3	15.144100	-23.121550	29	25/11/2007 a 01/08/2008; 15/08/2008 a 09/09/2008
Maio	Cascabulho	Coberta	CVMA4	15.269870	-23.173340	35	25/11/2007 a 13/02/2008; 22/03/2008 a 09/09/2008
Santiago	Variante S. Domingos	Coberta	CVST1	15.015000	-23.525100	206	24/11/2007 a 10/07/2008
Santiago	S. Jorge dos Órgãos	Coberta	CVST2	15.052450	-23.604090	333	25/11/2007 a 07/09/2008 excepto os dias 18/06/2008 e 27/08/2008
Santiago	Assomada	Coberta	CVST3	15.098300	-23.665883	569	29/11/2007 a 11/03/2008
Santiago	Ribeira Prata	Coberta	CVST4	15.229917	-23.742550	32	29/11/2007 a 12/09/2008
Santiago	Achada da Fazenda	Coberta	CVST5	15.118620	-23.519960	49	25/11/2007 a 07/09/2008

Tabela A.2 - Ilhas Barlavento

Ilha	Localidade	Tipo de estação	Código	Latitude	Longitude	Alt.	Período de operação
Boa Vista	Estoril	Coberta	CVBV1	16.173850	-22.914170	17	11/12/2007 a 07/09/2008
Boa Vista	Estância Baixo	Coberta	CVBV2	16.137620	-22.874510	47	11/12/2007 a 07/09/2008
Boa Vista	Chão do Palhal	Ar livre	CVBV4	16.081800	-22.814770	74	12/12/2007 a 06/09/2008
Boa Vista	Curral Velho	Ar livre	CVBV5	16.002840	-22.777660	39	12/12/2007 a 22/12/2007; 31/12/2007 a 13/09/2008
Boa Vista	Fungo das Figueiras	Ar livre	CVBV6	16.163960	-22.712810	37	13/12/2007 a 06/09/2008
Sal	Santa Maria	Coberta	CVSL1	16.600820	-22.897680	19	07/12/2007 a 05/09/2008
Sal	Presidência	Coberta	CVSL2	16.709050	-22.940180	38	07/12/2007 a 05/09/2008
Sal	Pedra Lume	Coberta	CVSL3	16.763290	-22.894380	23	07/12/2007 a 22/03/2008
Sal	Palmeira	Coberta	CVSL4	16.757760	-22.982560	15	07/12/2007 a 15/03/2008
Santo Antão	Passagem	Coberta	CVSA1	17.132840	-25.042680	301	05/12/2007 a 08/09/2008
Santo Antão	Ponta do Sol	Coberta	CVSA2	17.202280	-25.092790	29	05/12/2007 a 08/06/2008
Santo Antão	Coculi	Coberta	CVSA3	17.164740	-25.097270	117	05/12/2007 a 08/09/2008
Santo Antão	Ribeira da Cruz	Coberta	CVSA4	17.106180	-25.243370	314	07/12/2007 a 23/12/2007
Santo Antão	Lajedos	Coberta	CVSA5	17.020820	-25.167040	370	07/12/2007 a 08/09/2008
Santo Antão	Tarrafal	Coberta	CVSA6	16.956930	-25.310770	23	06/12/2007 a 14/09/2008
São Nicolau	Estância Brás	Coberta	CVSN1	16.649650	-24.320540	251	01/12/2007 a 11/09/2008
São Nicolau	Monte Gordo	Coberta	CVSN2	16.621870	-24.346480	1058	01/12/2007 a 11/09/2008
São Nicolau	Ribeira Brava	Coberta	CVSN3	16.619900	-24.292880	124	01/12/2007 a 11/09/2008
São Nicolau	Juncalinho	Coberta	CVSN4	16.613500	-24.131830	57	01/12/2007 a 11/09/2008
São Vicente	Norte Baía	Coberta	CVSV1	16.886440	-24.922810	67	04/12/2007 a 09/09/2008
São Vicente	Lazareto	Coberta	CVSV2	16.874840	-25.019840	35	04/12/2007 a 09/09/2008
São Vicente	S. Pedro	Coberta	CVSV3	16.851780	-25.036100	84	04/12/2007 a 04/06/2008
São Vicente	Calhau	Coberta	CVSV4	16.846370	-24.874110	24	04/12/2007 a 09/09/2008

B – Pares de ilhas com as respectivas distâncias

Tabela B.1 - Possíveis combinações de pares de ilhas com a respectiva distância.

Pares de ilhas	Distância (km)
Santo Antão - São Vicente	34
Brava - Fogo	36
Maio - Santiago	51
Boa Vista - Sal	63
São Nicolau - São Vicente	80
Fogo - Santiago	89
Boa Vista - Maio	102
Santo Antão - São Nicolau	108
Brava - Santiago	125
Boa Vista - Santiago	136
Fogo - Maio	138
Sal - São Nicolau	149
Maio - Sal	157
Boa Vista - São Nicolau	170
Fogo - São Nicolau	171
São Nicolau - Santiago	172
Brava - Maio	174
Sal - Santiago	181
Brava - São Nicolau	185
Maio - São Nicolau	191
Brava - São Vicente	204
Fogo - São Vicente	204
Boa Vista - Fogo	211
Sal - São Vicente	226
Brava - Santo Antão	231
Fogo - Santo Antão	233
Santiago - São Vicente	233
Fogo - Sal	242
Brava - Boa Vista	245
Santo Antão - Sal	249
Boa Vista - São Vicente	250
Maio - São Vicente	262
Santo Antão - Santiago	264
Brava - Sal	271
Boa Vista - Santo Antão	276
Maio - Santo Antão	292